

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Danijel Zadravec

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Dović, dipl. ing.

Student:

Danijel Zadravec

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Damiru Doviću na uloženom vremenu, trudu, iskazanoj pomoći i vrijednim savjetima tijekom izrade rada.

Zahvaljujem se svojim roditeljima i bratu na pruženoj podršci tijekom studiranja.

Hvala Dori na neizmjerljivoj ljubavi i podršci.

Danijel Zadravec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Danijel Zdravec**

Mat. br.: 0035190842

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Dinamička analiza rada solarnog toplovodnog sustava**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Dynamic analysis of solar hot water system operation**

Opis zadatka:

U sklopu diplomskog rada potrebno je razviti dinamički model za analizu rada solarnog toplovodnog sustava za pripremu potrošne tople vode (PTV) i grijanje prostora tijekom karakterističnog dana u pojedinom mjesecu tijekom godine. Simulacije rada solarnog toplovodnog sustava je potrebno provesti za odabranu zgradu pri dvije različite razine potrebne godišnje toplinske energije za grijanje, i to od 20 kWh/m² i 70 kWh/m² stambene površine.

Osnovni dijelovi solarnog sustava su solarni kolektori, spremnik tople vode, pomoćni generator topline i regulacija. Dijelove, dimenzije i toplinski učin sustava prilagoditi veličini i toplinskim potrebama zgrade.

Koristeći razvijeni model provesti parametarsku analizu utjecaja slijedećih parametara na isporučenu toplinsku energiju iz solarnog sustava:

- iznosa i raspodjele potrošnje PTV-a kroz dan
- temperature polaza/povrata sustava grijanja
- regulacije
- postavne temperature vode u spremniku
- veličine spremnika tople vode
- koeficijenta prolaza topline izmjenjivača solarnog kruga

Rezultate analiza dobivene dinamičkim modelom usporediti s onima dobivenim:

- mjesečnom i satnom metodom za proračun solarnog toplovodnog sustava prema normi HRN EN 15316-4-3:2017

- satnom metodom za proračun spremnika tople vode prema normi HRN EN 15316-5:2017 s podjelom spremnika na jedan i više volumnih dijelova.

U radu predložiti eventualne potrebne izmjene proračunskih procedura iz navedenih normi.

Potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

27. rujna 2018.

Datum predaje rada:

29. studenog 2018.

Predviđeni datum obrane:

5., 6. i 7. prosinca 2018.

Zadatak zadan:

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr.sc. Damir Dović

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	X
SUMMARY	XI
1. UVOD.....	1
1.1. Toplovodni solarni sustavi	2
2. DINAMIČKI MODEL	3
2.1. Model spremnika [4].....	6
2.2. Model solarnog kolektora [5].....	10
2.3. Pozivanje <i>MATLAB</i> skripte	11
2.3.1. Regulacija solarnog kruga.....	11
2.3.2. Regulacija pomoćnog grijača.....	11
2.3.3. Odvedeni maseni protok vode za potrebe PTV-a i energija za potrebe grijanja.	12
2.3.4. Ulazni podaci i spremanje rezultata simulacije	12
2.4. Kontrola rezultata tijekom simulacije	13
3. OPIS KORIŠTENIH NORMI I NJIHOVA PRIMJENA NA PRORAČUN SUSTAVA.	14
3.1. HRN EN 15316-5:2017 [6].....	15
3.1.1. Metoda A	15
3.1.1.1. Korak 0 - Inicijalizacija	16
3.1.1.2. Korak 2 – Volumen vode koja se isporučuje iz spremnika za potrebe potrošne tople vode.....	16
3.1.1.3. Korak 3 – Temperatura spremnika nakon isporuke potrošne tople vode	17
3.1.1.4. Koraci 4 i 5.....	18
3.1.1.5. Korak 6 – Indirektna predaja ili oduzimanje energije iz spremnika.....	19
3.1.1.6. Korak 7 – Prirodna stratifikacija.....	21
3.1.1.7. Korak 8 – Toplinski gubici i temperatura spremnika na kraju vremenskog koraka	21
3.1.1.8. Izmjenjivač topline.....	21
3.1.1.9. Komentar izmjena metode	22
3.1.2. Metoda B.....	23
3.1.2.1. Toplinski gubici	23
3.1.2.2. Korak 1 – Provjera dostupne energije za pripremu PTV i grijanje.....	23
3.1.2.3. Korak 2 – Energijska bilanca i temperatura spremnika bez doprinosa pomoćnog grijača.....	24
3.1.2.4. Korak 3 – Energija pomoćnog grijača	25
3.1.2.5. Komentar izmjena metode	26
3.2. HRN EN 15316-4-3:2017 [7]	28
3.2.1. Metoda 2	28
3.2.2. Metoda 3	30

3.2.3. Komentar izmjena metoda 2 i 3	32
3.3. Proračun sustava korištenjem metode A i metode 3	33
3.4. Proračun sustava korištenjem metode B i metode 3	36
3.5. Proračun sustava korištenjem metode 2	38
4. OPIS OBJEKTA I ANALIZIRANOG SUSTAVA S ULAZNIM PODACIMA PRORAČUNA.....	39
4.1. Opis objekta	40
4.2. Energetske potrebe	42
4.3. Solarni kolektor	44
4.4. Podsustav spremnika i pomoćnog grijača	46
5. REZULTATI	48
5.1. Dinamički model.....	48
5.1.1. Vremenski korak proračuna	48
5.1.2. Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje 70 kWh/m ²	50
5.1.3. Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje 20 kWh/m ²	56
5.2. Satni proračun – model sa stratifikacijom temperature u spremniku.....	61
5.2.1. Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje 70 kWh/m ²	61
5.2.2. Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje 20 kWh/m ²	66
5.3. Pojednostavljeni satni proračun – model sa spremnikom homogene temperature	69
5.3.1. Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje 70 kWh/m ²	69
5.3.2. Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje 20 kWh/m ²	72
5.4. Mjesečni proračun prema normi HRN EN 15316-4-3:2017.....	75
5.4.1. Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje 70 kWh/m ²	75
5.4.2. Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje 20 kWh/m ²	76
5.5. Usporedbe rezultata proračuna.....	78
6. PARAMETARSKA ANALIZA	80
6.1. Koeficijent prolaza topline izmjenjivača solarnog kruga	80
6.2. Iznos i raspodjela potrošnje PTV-a kroz dan	82
6.3. Temperatura polaza sustava grijanja	84
6.4. Regulacija.....	85
6.5. Postavna temperatura vode u spremniku	87
6.6. Veličina spremnika tople vode.....	88
7. ZAKLJUČAK.....	90
LITERATURA.....	94
PRILOZI.....	95

POPIS SLIKA

Slika 1. Komponente proračuna unutar programa <i>Simulation Studio</i>	3
Slika 2. Povezivanje izlaznih i ulaznih varijabli komponenata unutar programa <i>Simulation Studio</i>	4
Slika 3. Unošenje parametara za komponentu <i>Type 534</i>	4
Slika 4. Sučelje <i>TRNSED</i> aplikacije	5
Slika 5. Shematski prikaz spremnika modeliranog komponentom <i>Type 534</i> [4]	6
Slika 6. Prikaz izvlačenja PTV-a i nadopunjavanja spremnika svježom vodom	8
Slika 7. Temperature u spremniku prikazane komponentom <i>Type 65d</i>	13
Slika 8. Shematski prikaz temperatura segmenata spremnika prije i nakon isporuke potrošne tople vode	18
Slika 9. Blok dijagram proračuna korištenjem <i>metode A</i> i <i>metode 3</i>	34
Slika 10. Blok dijagram proračuna korištenjem <i>metode A</i> i <i>metode 3</i>	36
Slika 11. Analizirani objekt s osnovnim dimenzijama	40
Slika 12. Mjesečni $Q_{H,nd}$ za dvije razine potrebne godišnje energije za grijanje	42
Slika 13. Dnevni profil potrošnje PTV	43
Slika 14. Mjesečni prosjeci temperature zraka i intenziteta sunčevog zračenja	43
Slika 15. Ovisnost učinkovitosti kolektora o $\vartheta_{col,avg} - \vartheta_e$ i I_{sol}	44
Slika 16. Shematski prikaz akumulacijskog spremnika	46
Slika 17. Odstupanja energetske rezultata proračuna u ovisnosti o vremenskom koraku	48
Slika 18. Temperaturni profil segmenta spremnika grijanog pomoćnim grijačem za različite vremenske korake proračuna	49
Slika 19. Udjeli akumulirane i isporučene toplinske energije iz spremnika na godišnjoj razini za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	51
Slika 20. Mjesečna akumulirana i isporučena energija iz spremnika za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	51
Slika 21. Temperatura spremnika u jednoj godini za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	52
Slika 22. Temperatura spremnika 20. siječnja za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	53
Slika 23. Temperatura spremnika 20. srpnja za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ kod dinamičke simulacije	53
Slika 24. Toplinski tok koji se predaje spremniku i relevantne temperature za regulaciju solarnog kruga 20. siječnja za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	54
Slika 25. Toplinski tok koji se predaje spremniku i relevantne temperature za regulaciju solarnog kruga 20. srpnja za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	54
Slika 26. Udjeli akumulirane i isporučene toplinske energije iz spremnika na godišnjoj razini za zgradu s $Q_{H,nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	57
Slika 27. Mjesečna akumulirana i isporučena energija za zgradu s $Q_{H,nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	57
Slika 28. Temperatura spremnika 20. siječnja za zgradu s $Q_{H,nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	58
Slika 29. Temperatura spremnika 20. srpnja za zgradu s $Q_{H,nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	58
Slika 30. Toplinski tok koji se predaje spremniku i relevantne temperature za regulaciju solarnog kruga 20. siječnja za zgradu s $Q_{H,nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	59
Slika 31. Toplinski tok koji se predaje spremniku i relevantne temperature za regulaciju solarnog kruga 20. srpnja za zgradu s $Q_{H,nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	59
Slika 32. Udjeli akumulirane i isporučene toplinske energije iz spremnika na godišnjoj razini za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – satna metoda sa stratifikacijom temperature u spremniku	62
Slika 33. Godišnji temperaturni profil spremnika za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – satna metoda sa stratifikacijom temperature u spremniku	62

Slika 34. Temperatura spremnika 20. siječnja za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – satna metoda sa stratifikacijom temperature u spremniku	63
Slika 35. Temperatura spremnika 20. srpnja za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – satna metoda sa stratifikacijom temperature u spremniku	64
Slika 36. Toplinski tok koji se predaje spremniku 20. siječnja za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – satna metoda sa stratifikacijom temperature u spremniku	64
Slika 37. Toplinski tok koji se predaje spremniku 20. srpnja za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – satna metoda sa stratifikacijom temperature u spremniku	65
Slika 38. Udjeli akumulirane i isporučene toplinske energije iz spremnika na godišnjoj razini za zgradu s $Q_{H,nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – satna metoda sa stratifikacijom temperature u spremniku	67
Slika 39. Godišnji temperaturni profil spremnika za zgradu s $Q_{H,nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – satna metoda sa stratifikacijom temperature u spremniku.....	67
Slika 40. Temperatura i toplinski tokovi koji se predaju spremniku 20. veljače za zgradu s $Q_{H,nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – satna metoda sa stratifikacijom temperature u spremniku	68
Slika 41. Udjeli akumulirane i isporučene toplinske energije iz spremnika na godišnjoj razini za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – pojednostavljena satna metoda	70
Slika 42. Usporedba temperature spremnika prema proračunu po pojednostavljenoj satnoj metodi i prosječne temperature spremnika kod dinamičke simulacije pri 70 $\text{kWh/m}^2\text{a}$ potrebne energije za grijanje	70
Slika 43. Temperatura i toplinski tokovi koji se predaju spremniku 20. veljače pri potrebnoj energiji za grijanje od 70 $\text{kWh/m}^2\text{a}$ – pojednostavljena satna metoda.....	71
Slika 44. Udjeli akumulirane i isporučene toplinske energije iz spremnika na godišnjoj razini za zgradu s $Q_{H,nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – pojednostavljena satna metoda	73
Slika 45. Usporedba temperature spremnika prema proračunu po pojednostavljenoj satnoj metodi i prosječne temperature spremnika kod dinamičke simulacije pri 20 $\text{kWh/m}^2\text{a}$ potrebne energije za grijanje	73
Slika 46. Udjeli akumulirane i isporučene toplinske energije iz spremnika na godišnjoj razini za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – mjesečna metoda.....	76
Slika 47. Udjeli akumulirane i isporučene toplinske energije iz spremnika na godišnjoj razini za zgradu s $Q_{H,nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – mjesečna metoda.....	76
Slika 48. Usporedba rezultata proračuna akumulirane toplinske energije solarnog podsustava u spremnik pri opterećenju od 70 $\text{kWh/m}^2\text{a}$	78
Slika 49. Usporedba rezultata proračuna akumulirane toplinske energije solarnog podsustava u spremnik pri opterećenju od 20 $\text{kWh/m}^2\text{a}$	78
Slika 50. Odstupanja rezultata analize u odnosu na referentni koeficijent izmjenjivača topline od 200 W/K – dinamička simulacija	81
Slika 51. Razlika proizvedenih i predanih toplina u odnosu na iznos potrošnje PTV-a od 12,5 $\text{kWh/m}^2\text{a}$ za temperaturni profil prema normi [9] – dinamička simulacija.....	83
Slika 52. Udio neisporučene energije za grijanje iz spremnika u zavisnosti o temperaturi polaza sustava grijanja pri referentnim parametrima dinamičke simulacije	84
Slika 53. Broj paljenja pomoćnog grijača ovisno o regulacijskom rasponu i odstupanja rezultata analize u odnosu na regulacijski raspon od 10 °C – dinamička simulacija	85
Slika 54. Odstupanja rezultata analize u odnosu na referentnu postavnu temperaturu od 50 °C – dinamička simulacija.....	88
Slika 55. Odstupanja rezultata analize u odnosu na referentni volumen spremnika od 300 l – dinamička simulacija	89

POPIS TABLICA

Tablica 1. Karakteristike analiziranog objekta za dvije razine energetske potrebe	41
Tablica 2. Parametri solarnog podsustava	45
Tablica 3. Parametri spremnika i pomoćnog grijača	47
Tablica 4. Rezultati dinamičke simulacije za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	50
Tablica 5. Rezultati dinamičke simulacije za zgradu s $Q_{H,nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	56
Tablica 6. Rezultati proračuna po satnoj metodi sa stratifikacijom temperature u spremniku za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	61
Tablica 7. Rezultati proračuna po satnoj metodi sa stratifikacijom temperature u spremniku za zgradu s $Q_{H,nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	66
Tablica 8. Rezultati proračuna po pojednostavljenoj satnoj metodi sa homogenim spremnikom za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	69
Tablica 9. Rezultati proračuna po pojednostavljenoj satnoj metodi sa homogenim spremnikom za zgradu s $Q_{H,nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	72
Tablica 10. Rezultati proračuna po mjesečnoj metodi za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	75
Tablica 11. Rezultati proračuna po mjesečnoj metodi za zgradu s $Q_{H,nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$	77
Tablica 12. Odstupanje godišnjih rezultata analiziranih metoda od rezultata dinamičke simulacije na godišnjoj razini	79
Tablica 13. Rezultati parametarske analize koeficijenta izmjenjivača topline – dinamička simulacija	81
Tablica 14. Rezultati parametarske analize iznosa i raspodjele PTV-a – dinamička simulacija	82
Tablica 15. Rezultati parametarske analize temperaturnog raspona regulacije pomoćnog grijača – dinamička simulacija	86
Tablica 16. Rezultati analize postavne temperature pomoćnog grijača – dinamička simulacija	87
Tablica 17. Rezultati parametarske analize volumena akumulacijskog spremnika – dinamička simulacija	89

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A_{\text{edge};i}$	m^2	Površina stijenke segmenta spremnika
A_{sol}	m^2	Efektivna površina svih kolektora u sustavu
$A_{\text{x};\text{sol};\text{m}}$	m^2	Dio površine kolektora korišten za grijanje ili za PTV
a_1	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	Koeficijent gubitaka kolektora prvog reda
a_2	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^2)$	Koeficijent gubitaka kolektora drugog reda
c_w	$\text{J}/(\text{kgK})$	specifični toplinski kapacitet vode
F_R	-	Faktor odvođenja topline kolektora
f_{app}	-	Korekcijski faktor
f_{bu}	-	Faktor regulacije pomoćnog grijača
f_{col}	-	Korekcijski faktor uslijed orijentacije kolektora
$f_{\text{sto};\text{bac};\text{acc}}$	-	Faktor prilagodbe toplinskih gubitaka za mjesečni ili godišnji vremenski korak
$f_{\text{sto};\text{dis};\text{ls}}$	-	Faktor toplinskih gubitaka cjevovoda podsustava spremnika
$f_{\text{x};\text{aux}}$	-	Faktor udjela spremnika grijanog pomoćnim grijačem
$f_{\text{x};\text{sto};\text{m}}$	-	Faktor korekcije kapaciteta spremnika
$f_{\text{x};\text{tmp};\text{m}}$	-	Prva procjena udjela solarnog doprinosa u isporučenoj energiji
$f_{\text{x};\text{use};\text{m}}$	-	Faktor udjela sustava korištenog za grijanje ili PTV
H_{loop}	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	Koeficijent gubitaka cjevovoda i kolektora solarnog kruga
$H_{\text{sol};\text{exh}}$	W/K	Koeficijent izmjenjivača topline solarnog kruga
$H_{\text{sto};\text{H};\text{exh}}$	W/K	Koeficijent izmjenjivača topline kruga grijanja
$H_{\text{sol};\text{loop}}$	W/K	Koeficijent toplinskih gubitaka cjevovoda solarnog kruga
$H_{\text{sto};\text{edge};\text{ls}}$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	Koeficijent toplinskih gubitaka segmenta spremnika sveden na površinu
$H_{\text{sto};\text{ls}}$	W/K	Koeficijent toplinskih gubitaka spremnika
$H_{\text{x};\text{sto};\text{ls}}$	W/K	Koeficijent toplinskih gubitaka dijela spremnika koji se koristi za potrebe grijanja ili PTV-a
I_{sol}	W/m^2	Globalno sunčevo zračenje na nagnutu plohu
$K_{\text{hem}}(50^\circ)$	-	Faktor polukružne promjene kuta upadnog zračenja
\dot{m}_{col}	$\text{kg}/(\text{s})$	Maseni protok fluida kroz kolektor sveden na korisnu površinu kolektora
\dot{m}_{sol}	kg/s	Maseni protok fluida kroz kolektor

\dot{m}_W	kg/s	Maseni protok PTV kroz spremnik
$N_{sol;mod}$	-	Broj solarnih kolektora
N_{vol}	-	Broj segmenata na koji je podijeljen spremnik
$P_{sol;pmp}$	W	Snaga pumpe solarnog kruga
Q_{exh}	kWh	Toplina koja se izmjenjuje izmjenjivačem topline
$Q_{H;dis;out;req}$	kWh	Toplinska energija koju je potrebno predati sustavu grijanja
$Q_{H;nd}$	kWh	Potrebna toplinska energija za grijanje prostora
$Q_{H;sto;bu;in}$	kWh	Energija pomoćnog grijača koja se predaje spremniku
$Q_{H;sto;bu;in,tmp}$	kWh	Potrebna toplinska energija pomoćnog grijača
$Q_{sol;loop;ls;h}$	kWh	Gubici cjevovoda solarnog kruga
$Q_{sol;loop;out;h}$	kWh	Toplinska energija na izlazu iz solarnog kruga
$Q_{sol;out;h}$	kWh	Toplina koju kolektor predaje cjevovodu solarnog kruga
$Q_{sto;H;dis}$	kWh	Toplina predana iz spremnika u podsustav razvoda grijanja
$Q_{sto;in;i}$	kWh	Kapacitet segmenta za skladištenje energije
$Q_{sto;in;max}$	kWh	Ukupan kapacitet spremnika dostupan za skladištenje energije
$Q_{sto;in;req}$	kWh	Toplinska energija koju je potrebno uskladištiti u spremniku
$Q_{sto;ls;vol;i}$	kWh	Toplinski gubici segmenta spremnika
$Q_{sto;ls;tot}$	kWh	Toplinski gubici čitavog spremnika
$Q_{sto;out;i}$	kWh	Toplinska energija dostupna za indirektno odvođenje iz segmenta spremnika
$Q_{sto;out;max}$	kWh	Ukupna toplinska energija u spremniku dostupna za indirektno odvođenje
$Q_{sto;out;req}$	kWh	Toplinska energija koju je potrebno preuzeti iz spremnika
$Q_{sto;sol;in;h}$	kWh	Energija solarnog sustava koja se skladišti u spremniku
$Q_{sto;sol;in;req}$	kWh	Energija solarnog sustava dostupna za akumulaciju u spremniku
$Q_{sto;W;dis}$	kWh	Toplinska energija predana iz spremnika u podsustav razvoda PTV-a
$Q_{W;dis;out;req}$	kWh	Toplinska energija koju je potrebno predati sustavu razvoda PTV-a
$Q_{W;sto;out;tmp}$	kWh	Toplinska energija koju spremnika predaje za potrebe PTV-a bez doprinosa pomoćnog grijača
$Q_{W;sto;out;tmp2}$	kWh	Ostatak toplinske energije koju spremnika predaje za potrebe PTV-a nakon doprinosa pomoćnog grijača
$Q_{x;bu;out;m}$	kWh	Doprinos pomoćnog grijača za potrebe PTV-a ili grijanja
$Q_{x;bu;sto;ls;m}$	kWh	Gubici dijela spremnika grijanog pomoćnim grijačem, a koji se koristi za potrebe PTV-a ili grijanja
$Q_{x;sol;bu;out;m}$	kWh	Isporučena energija solarnog sustava i pomoćnog grijača za potrebe PTV-a ili grijanja
$Q_{x;sol;ls;us}$	kWh	Korigirano toplinsko opterećenje sustava
$Q_{x;sol;out;m}$	kWh	Solarni doprinos za potrebe PTV-a ili grijanja

$Q_{x;sol;sto;ls;m}$	kWh	Toplinski gubici dijela spremnika grijanog solarnim sustavom, a koji se koristi za potrebe PTV-a ili grijanja
$Q_{x;sol;tmp;m}$	kWh	Prva procjena solarnog doprinosa za potrebe grijanja ili PTV-a
$Q_{x;sol;us;m}$	kWh	Energija koju solarni sustav treba predati za zadovoljenje potreba grijanja ili PTV-a
$Q_{X;sto;in}$	kWh	Energija koju primarni generator topline može predati spremniku
$Q_{X;sto;in,tmp}$	kWh	Energija koju primarni generator topline predaje spremniku
T_h^*	m ² K/W	Reducirana temperaturna razlika kolektora
t_{ci}	h	Vremenski korak proračuna
U_L	W/(m ² K)	Koeficijent toplinskih gubitaka kolektora
$V_{sto;tot}$	l	Ukupni volumen spremnika
$V_{sto;use,W}$	l	Volumen vode koja se oduzima iz spremnika za potrebe PTV-a
$V_{sto;vol;i}$	l	Volumen segmenta spremnika
$V_{X;sto;bu}$	l	Dio spremnika grijanog pomoćnim grijačem korišten za potrebe grijanja ili PTV-a
$V_{X,sto,sol}$	l	Dio spremnika u kojem se skladišti toplina iz kolektora za potrebe grijanja ili pripreme PTV-a
$V_{x;sto;tot}$	l	Dio ukupnog volumena spremnika korišten za potrebe grijanja ili PTV-a
$X_{x;m}$	-	X faktor <i>f-chart</i> metode za grijanje ili PTV
$Y_{x;m}$	-	Y faktor <i>f-chart</i> metode za grijanje ili PTV
α	-	Faktor apsorpcije premaza apsorbera
$\Delta\vartheta_{exh}$	°C	Temperaturna razlika dviju struja u izmjenjivaču topline
$\Delta\vartheta_{H;sto;exh}$	°C	Temperaturna razlika na izmjenjivaču topline kruga grijanja
$\Delta\vartheta_{sol;pmp;off}$	°C	Temperaturna razlika pri kojoj se gasi pumpa solarnog kruga
$\Delta\vartheta_{sol;pmp;on}$	°C	Temperaturna razlika pri kojoj se pali pumpa solarnog kruga
$\Delta\vartheta_{sto;bu;set;high}$	°C	Razlika između temperature na kojoj se pomoćni grijač gasi i postavne temperature
$\Delta\vartheta_{sto;bu;set;low}$	°C	Razlika između postavne temperature i temperature na kojoj se pomoćni grijač pali
η_0	-	Vršna učinkovitost kolektora
η_{col}	-	Učinkovitost solarnog kolektora
η_{loop}	-	Učinkovitost kolektorskog kruga s obzirom na izmjenjivač topline
η_{sol}	-	Učinkovitost solarnog sustava
$\vartheta_{col;avg}$	°C	Prosječna temperatura fluida u kolektoru
ϑ_e	°C	Temperatura vanjskog zraka
$\vartheta_{exh;out}$	°C	Temperatura struje na izlazu iz izmjenjivača topline
$\vartheta_{H;dis;rtn}$	°C	Temperatura povrata kruga grijanja

$\vartheta_{H,out,min}$	°C	Temperatura polaza podsustava grijanja
$\vartheta_{H,ref,m}$	°C	Referentna temperatura kod proračuna grijanja
ϑ_{int}	°C	Temperatura u grijanom prostoru
$\vartheta_{sol,amb}$	°C	Temperatura okoline cjevovoda solarnog kruga
$\vartheta_{sol,col,out}$	°C	Temperatura na izlazu iz kolektora
$\vartheta_{sol,loop,in}$	°C	Temperatura na ulazu u kolektor
$\vartheta_{sol,loop,out}$	°C	Temperatura na izlazu iz solarnog kruga
$\vartheta_{sto,amb}$	°C	Temperatura okoliša spremnika
$\vartheta_{sto,bu;set}$	°C	Postavna temperatura dijela spremnika grijanog pomoćnim grijačem
$\vartheta_{sto,H}$	°C	Konačna temperatura spremnika u trenutnom vremenskom koraku
$\vartheta_{sto,H;0}$	°C	Temperatura spremnika u prethodnom vremenskom koraku
$\vartheta_{sto,H,min}$	°C	Minimalna temperatura u spremniku potrebna za predaju topline sustavu grijanja
$\vartheta_{sto,H,tmp1}$	°C	Međutemperatura spremnika nakon oduzimanja energije za pripremu PTV-a
$\vartheta_{sto,H,tmp2}$	°C	Međutemperatura spremnika nakon oduzimanja energije za pripremu PTV-a i za potrebe grijanja
$\vartheta_{sto,H,tmp3}$	°C	Temperatura spremnika bez doprinosa pomoćnog grijača
$\vartheta_{sto,H,tmp4}$	°C	Međutemperatura spremnika nakon predaje energije pomoćnog grijača
$\vartheta_{sto,H,tmp5}$	°C	Međutemperatura spremnika nakon doprinosa pomoćnog grijača i oduzimanja energije za potrebe PTV-a
$\vartheta_{sto,sol;set}$	°C	Postavna temperatura dijela spremnika grijanog solarnim kolektorom
$\vartheta_{sto;set}$	°C	Postavna temperatura spremnika
$\vartheta_{sto,vol;i}$	°C	Temperatura fluida u segmentu spremnika
$\vartheta_{W,cold}$	°C	Temperatura svježe vode
$\vartheta_{W,out,min}$	°C	Minimalna temperatura polaza PTV-a
$\vartheta_{W,ref,m}$	°C	Referentna temperatura kod proračuna pripreme PTV-a
$\vartheta_{W,srv}$	°C	Temperatura PTV na izljevnom mjestu
ρ_w	kg/m ³	Gustoća vode
τ	-	Faktor propusnosti stakla
$\Phi_{cond,i}$	W	Toplinski tok koji segment spremnika provođenjem izmjenjuje sa susjednim segmentima
Φ_{flow}	W	Toplinski tok koji uslijed prestrujavanja fluida
$\Phi_{mix,i}$	W	Toplinski tok uslijed miješanja slojeva zbog temperaturne inverzije
$\Phi_{sol,loop;ls}$	W	Toplinski tok gubitaka cjevovoda solarnog kruga
$\Phi_{sto,bu}$	W	Snaga pomoćnog grijača
$\Phi_{sto,ls;i}$	W	Toplinski tok gubitaka segmenta spremnika
$\Phi_{W,dis,out,req}$	W	Potreban toplinski tok na ulazu podsustava razvoda PTV

SAŽETAK

Provedena je analiza podsustava proizvodnje toplinske energije referentne jednoobiteljske kuće na području grada Zagreba pri dvije razine potrebne godišnje toplinske energije za grijanje (70 i 20 kWh/m²). U tu svrhu razvijen je u programskom paketu *TRNSYS* dinamički model analiziranog sustava. Dodatno, ispitana su tri proračuna različitih kompleksnosti razvijena temeljem normi HRN EN 15316-5:2017 i HRN EN 15316-4-3:2017.

Pri korištenim referentnim parametrima sustava, količina prikupljene sunčeve energije približno je jednaka kod obje razine toplinskog opterećenja, a ostatak potrebne toplinske energije daje pomoćni grijač. Odstupanja rezultata satne metode sa stratifikacijom temperature u spremniku minimalna su u odnosu na rezultate simulacije dinamičkim modelom zbog čega ona može biti prikladna zamjena za dinamički model. Odstupanja mjesečne i pojednostavljene satne metode nešto su veća pri čemu je mjesečna metoda zbog jednostavnosti uporabe prikladna za grube procjene rada sustava na godišnjoj razini.

Dnevna raspodjela potrošnje PTV-a ima zanemariv utjecaj na prikupljenu toplinsku energiju solarnog sustava i pomoćnog grijača, dok porast potrebne energije za PTV dovodi do porasta prikupljene sunčeve energije, ali i energije pomoćnog grijača. Povećanje koeficijenta izmjenjivača topline solarnog kruga i smanjenje postavne temperature i regulacijskog raspona pomoćnog grijača uzrokuje povećanje učinkovitosti solarnog sustava i smanjenje potrebne energije pomoćnog grijača, dok povećanje volumena spremnika uzrokuje rast učinkovitosti solarnog sustava, ali i povećane potrebe za energijom pomoćnog grijača zbog većih toplinskih gubitaka spremnika.

Ključne riječi: simulacija sunčevog sustava, akumulacijski spremnik, parametarska analiza

SUMMARY

The analysis of a heat generation subsystem in a benchmark single family dwelling located in Zagreb area was conducted at two levels of annual space heating requirements (70 and 20 kWh/m²). For this purpose, a dynamic system model was developed in the *TRNSYS* software. Additionally, three different calculation procedures based on European standards HRN EN 15316-5:2017 and HRN EN 15316-4-3:2017 were examined.

For the reference system parameters, accumulated solar energy at both levels of heat load were approximately equal, while the difference of required energy was submitted by the back-up heater. Hourly calculation method with a stratified storage tank can be a suitable replacement for the dynamic system model, as deviations of its results were insignificant compared to dynamic model results. Deviations of simplified hourly and monthly methods were comparatively larger, although due to its simplicity of use, monthly method results can be used as a rough estimate of annual system performance.

Daily DHW consumption profile had negligible effect on accumulated solar and back-up energy, while the rise of annual DHW energy requirements was compensated by both the solar collector and back-up heater additional energy contribution. Decrease of back-up heater setpoint temperature and control temperature range, as well as increase of a solar loop heat exchanger coefficient caused an increase of solar system efficiency and decrease of required back-up energy, while the increase of a storage tank volume caused an increase of both the solar system efficiency and required back-up energy due to the bigger storage tank heat losses.

Key words: solar system simulation, storage tank, parametric analysis

1. UVOD

Sektor zgradarstva u Europskoj je uniji odgovoran za oko 40 % ukupne potrošnje energije i za oko 36 % emisije CO₂ zbog čega je prepoznat kao sektor s najvećim potencijalom za smanjenje ukupne energetske potrošnje. Postizanjem veće razine energetske učinkovitosti u zgradarstvu direktno se utječe na ugodniji i kvalitetniji boravak u zgradi, duži životni vijek zgrade te se doprinosi zaštiti okoliša. [1]

Energetska učinkovitost definirana je kao suma isplaniranih i provedenih mjera čiji je cilj korištenje minimalno moguće količine energije tako da razina udobnosti i stopa proizvodnje ostanu sačuvane. Postizanje energetske učinkovitosti znači uporaba manje količine energije za obavljanje istog posla ili funkcije, pri čemu ne dolazi do narušavanja kvalitete života ili uvjeta rada. [2]

Neke od mjera energetske učinkovitosti u zgradarstvu su [3]:

- energetski pregled zgrade i energetski certifikat, koji pokazuje energetsko stanje pojedine zgrade ili njenog dijela;
- povećanje toplinske zaštite zgrade (postavljanje toplinske izolacije te energetske učinkovite stolarije);
- povećanje učinkovitosti sustava grijanja, hlađenja i ventilacije;
- povećanje učinkovitosti sustava rasvjete i električnih uređaja;
- korištenje obnovljivih izvora energije.

Sunčevo zračenje najveći je izvor obnovljive energije na Zemlji i može se direktno iskorištavati pomoću sunčevih kolektora za zagrijavanje vode i zraka, koncentrirajućih kolektora za proizvodnju električne energije te fotonaponskih ćelija za direktnu proizvodnju električne energije. [1] Godišnja dozračena energija Sunca veća je 15 000 puta od ukupnih svjetskih energetskih potreba. [2] Ipak, problem kod eksploatacije sunčeve energije predstavlja niska gustoća energije u odnosu na fosilne izvore te nejednolika raspoloživost u prostoru i vremenu.

1.1. Toplovodni solarni sustavi

Sunčeva energija se aktivno prikuplja uz pomoć solarnih kolektora koji apsorbiraju sunčevo zračenje i predaju ga tekućem nosiocu topline. Učinkovitost prikupljanja sunčevog zračenja ovisi o karakteristikama kolektora te o meteorološkim uvjetima i uvjetima rada kolektora kao što su temperatura i maseni protok nosioca topline.

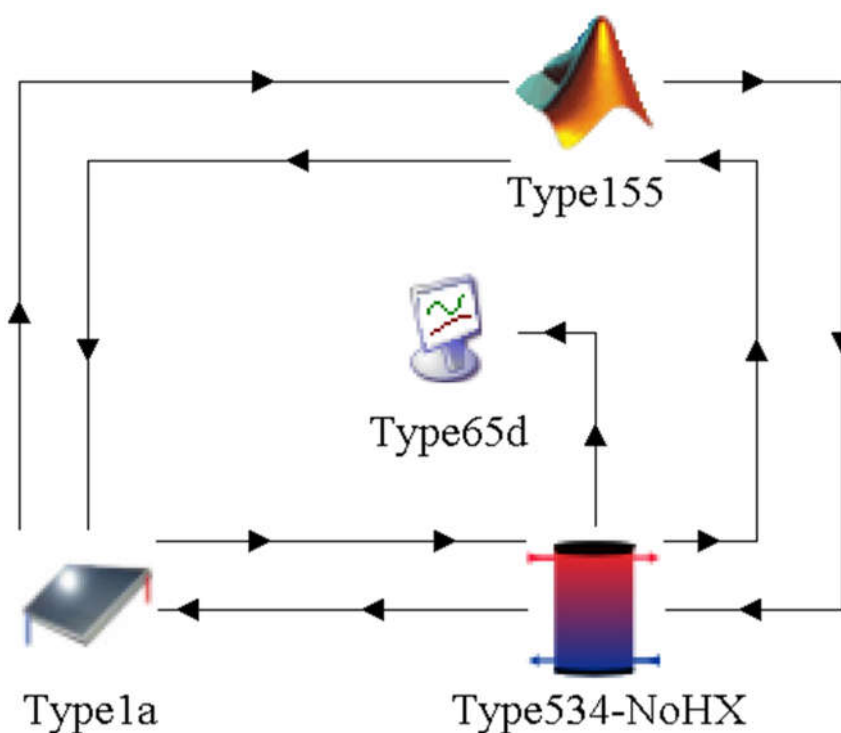
Raspoloživost sunčeve energije obično je najmanja u razdoblju kad su potrebe za toplinskom energijom najveće. U solarnim je sustavima stoga nužno korištenje dodatnih komponenti za učinkovitije korištenje sunčeve energije. U svrhu skladištenja sunčeve energije u razdoblju kad postoje viškovi i korištenja u razdoblju povećane potrebe koriste se akumulacijski spremnici ispunjeni toplom vodom. Pri tom je bitno da spremnici imaju odgovarajuću toplinsku izolaciju kako ne bi gubili prikupljenu toplinu prema okolišu i da budu optimalno dimenzionirani kako bi se skladištenjem energije postigla temperatura dovoljno visoka za učinkovito korištenje energije, ali ne previsoka čime se smanjuje učinkovitost rada sustava i skraćuje životni vijek opreme. Kod dimenzioniranja spremnika i izolacije potrebno je uzeti u obzir i ekonomske čimbenike.

Kad bi se solarni kolektori dimenzionirali za vršno opterećenje, bili bi značajno predimenzionirani za rad u najvećem dijelu perioda korištenja. Takvi sustavi bi investicijski bili vrlo skupi, a uz to bi zahtijevali veliku površinu za smještaj kolektora koja često nije raspoloživa. Zbog toga se uz solarne kolektore koriste i pomoćni grijači koji pokrivaju opterećenja koja solarni kolektor ne može zadovoljiti. Kod projektiranja solarnih sustava potrebno je pronaći kompromis između investicijskih troškova, pogonskih troškova pomoćnog grijača i količine iskorištene obnovljive sunčeve energije.

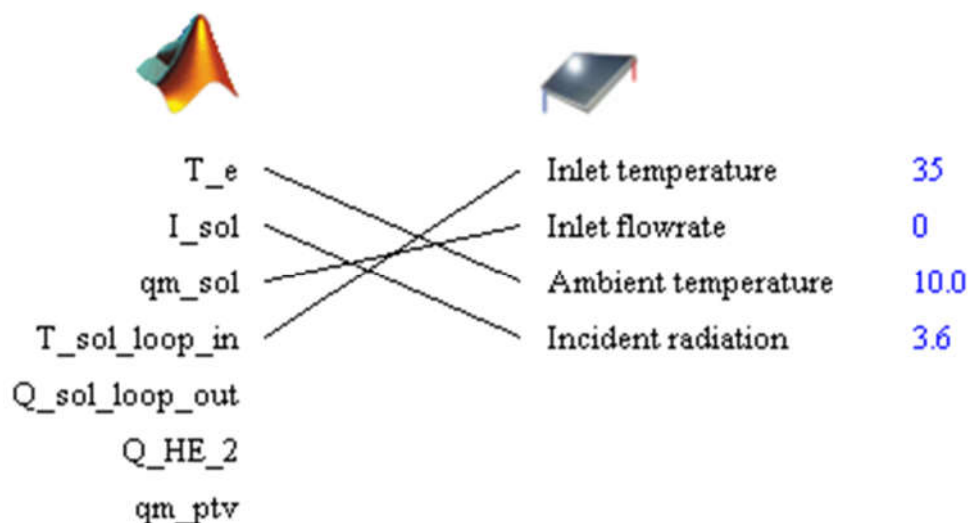
Cilj ovog rada je istražiti mogućnosti proračuna rada solarnih sustava pomoću metoda različitih kompleksnosti. Također, radom se želi ispitati utjecaj različitih parametara sustava na rad solarnih sustava u svrhu optimalnog projektiranja sustava. Pri tome je fokus rada postavljen na proračun podsustava proizvodnje toplinske energije, odnosno solarnog kolektora, pomoćnog grijača i akumulacijskog spremnika.

2. DINAMIČKI MODEL

Za simulaciju rada akumulacijskog spremnika povezanog s solarnim kolektorom i s pomoćnim generatorom topline izrađen je dinamički model u programskom paketu *TRNSYS 17*. Model sustava kreiran je u programu *Simulation Studio* korištenjem komponenti *Type 1a* (kolektor s učinkovitosti definiranom pomoću kvadratne jednadžbe), *Type 534* (cilindrični vertikalni akumulacijski spremnik), *Type 155* (komponenta za pozivanje *MATLAB* skripte) i *Type 65d* (online plotter). Svaka od navedenih komponenti ima definirane potrebne ulazne i izlazne veličine pri čemu su komponente međusobno povezane tako da su izlazne veličine pojedine komponente ulazne veličine druge komponente. Grafički prikaz povezanih komponenti dan je na Slici 1. Primjer povezivanja izlazne veličine komponente *Type 155* s ulaznim veličinama komponente *Type 1a* prikazan je na Slici 2. Osim ulaznih i izlaznih veličina, komponente imaju i parametre proračuna koji su konstantni tijekom simulacije i zadaju se prije izvođenja simulacije. Primjer unošenja parametara za komponentu *Type 534* dan je na Slici 3.



Slika 1. Komponente proračuna unutar programa *Simulation Studio*



Slika 2. Povezivanje izlaznih i ulaznih varijabli komponenata unutar programa *Simulation Studio*

Parameter						
	Input	Output	Derivative	Comment		
		Name	Value	Unit	More	Macro
1		LU for data file	-1	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
2		Number of tank nodes	4	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
3		Number of ports	1	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
4		Number of immersed heat exchangers	0	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
5		Number of miscellaneous heat flows	1	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
6		Tank volume	0.3	m ³	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
7		Tank height	1.5	m	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
8		Tank fluid	n		More...	<input checked="" type="checkbox"/>

Slika 3. Unošenje parametara za komponentu *Type 534*

Nakon što je model kreiran, pomoću programa *TRNEdit* izrađena je samostojeća *TRNSED* aplikacija za čije izvođenje nije potrebno posjedovati *TRNSYS* licencu. *TRNSED* aplikacija daje mogućnost promjene parametara komponenata modela i izvođenje simulacija na bilo kojem računalu koje zadovoljava minimalne sistemske zahtjeve programa. Na Slici 4 prikazano je sučelje samostojeće *TRNSED* aplikacije. U nastavku su detaljnije opisane komponente koje čine model sustava.

TRNSYS 17

generated by TrnsysStudio, nedjelja, listopad 07, 2018 at 17:04

Simulation Parameters

Start hour	<input type="text" value="0.00000"/>	hours
End hour	<input type="text" value="8760.00000"/>	hours
Timestep	<input type="text" value="0.02000"/>	hours

*** Model Type1a (Type 1, Unit 4)

PARAMETERS

Number in series	<input type="text" value="1.00000"/>	-
Collector area	<input type="text" value="4.00000"/>	m ²
Fluid specific heat	<input type="text" value="4.19000"/>	kJ/kg.K
Efficiency mode	<input type="text" value="2.000"/>	-
Tested flow rate	<input type="text" value="0.08"/>	kg/s.m ²
Intercept efficiency	<input type="text" value="0.752"/>	-
Efficiency slope	<input type="text" value="3.5"/>	W/m ² .K
Efficiency curvature	<input type="text" value="0.00000"/>	kJ/hr.m ² .K ²

*** Model Type155 (Type 155, Unit 5)

PARAMETERS

Number of inputs	<input type="text" value="6.000"/>	-
Number of outputs	<input type="text" value="7.000"/>	-
Calling Mode	<input type="text" value="0.000"/>	-
Keep Matlab open after simulation	<input type="text" value="0.000"/>	-

*** Model Type65d (Type 65, Unit 7)

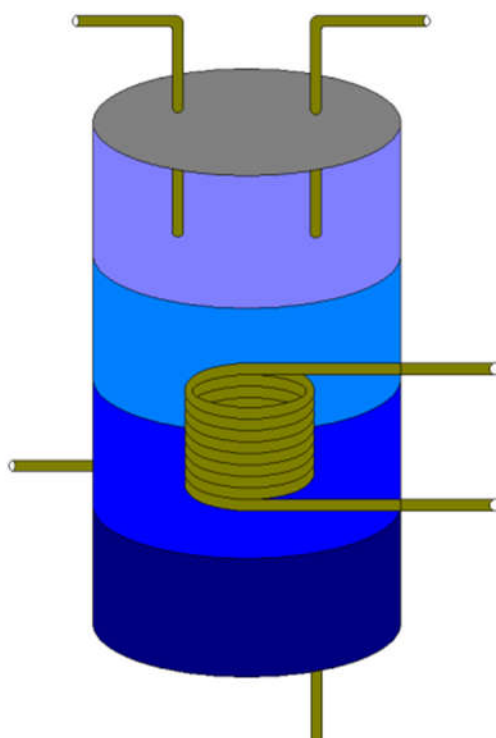
PARAMETERS

Nb. of left-axis variables	<input type="text" value="4.000"/>	-
----------------------------	------------------------------------	---

Slika 4. Sučelje TRNSYS aplikacije

2.1. Model spremnika [4]

Kao model akumulacijskog spremnika korištena je komponenta *Type 534 – Vertical Cylindrical Storage Tank*. Navedena komponenta model je cilindričnog vertikalnog akumulacijskog spremnika ispunjenog konstantnim volumenom fluida sa mogućnošću modeliranja uronjenog izmjenjivača topline. Spremnik je u modelu po visini podijeljen na čvorove koji predstavljaju slojeve fluida homogene temperature čime je modelirana temperaturna stratifikacija unutar spremnika. Spremnik modeliran komponentom *Type 534* prikazan je na Slici 5.



Slika 5. Shematski prikaz spremnika modeliranog komponentom *Type 534* [4]

Korisnik komponente može definirati broj čvorova po visini spremnika, a svaki čvor je u toplinskoj interakciji s čvorovima s kojima graniči i s vanjskim okolišem. Toplina se može prenositi na susjedne čvorove provođenjem i prestrujavanjem fluida iz jednog čvora u drugi koje je uzrokovano ustrojavanjem fluida kroz ulazni priključak ili uzgonskim efektima uslijed temperaturne inverzije u spremniku. Čvorovi izmjenjuju toplinu s okolišem preko toplinskih gubitaka koji su definirani koeficijentom gubitaka svedenim na površinu stjenke spremnika, geometrijom spremnika i razlikom temperature čvora i okolišne temperature. U spremniku je moguće definirati četiri vrste izmjenjivača topline – vertikalni cijevni snop, horizontalni cijevni snop, cijev u obliku serpentine ili u obliku spirale čija se geometrija definira pomoću parametara

komponente. Za svaki čvor kao ulazna veličina komponente može se definirati iznos dodatne dovedene ili odvedene topline. Podržani fluidi unutar spremnika i unutar izmjenjivača topline su čista voda, otopine etilen glikola ili propilen glikola čija svojstva mogu biti funkcije temperature.

U svrhu lakše usporedbe rezultata simulacije s rezultatima dobivenim korištenjem procedure prema normi HRN EN 15316-5:2017 u modelu nisu korišteni modeli izmjenjivača topline spremnika kod kojih koeficijent prolaza topline ovisi o definiranoj geometriji i svojstvima i protocima fluida nego je izmjenjivač topline definiran *MATLAB* skriptom gdje se koeficijent izmjenjivača topline, koji predstavlja omjer izmijenjene topline i temperaturne razlike dviju struja, unosi kao parametar. Spremnik predaje izmjenjivaču topline definiranom u *MATLAB* skripti informaciju o temperaturi fluida u čvoru u kojem se izmjenjivač nalazi, a izmjenjivač predaje spremniku informaciju o toplinskoj energiji koju predaje ili oduzima od spremnika preko ulazne veličine dodatne toplinske energije u čvor.

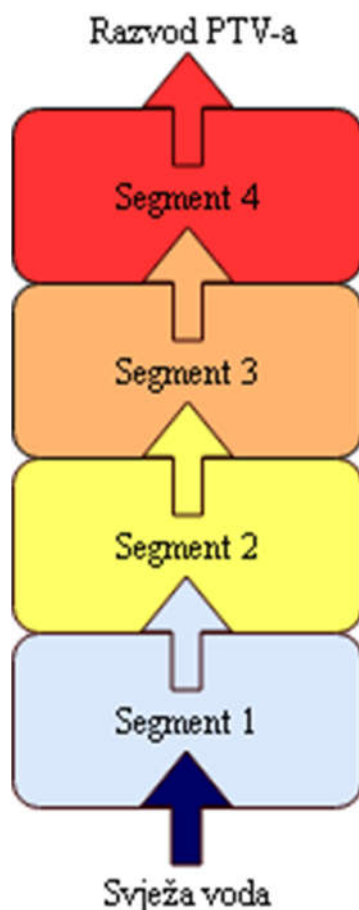
Koeficijent toplinskih gubitaka po površini spremnika moguće je zadati za vrh, plašt i dno spremnika. Ukupan koeficijent toplinskih gubitaka u modelu je ravnomjerno raspoređen po cjelokupnoj površini spremnika. Toplinski gubici spremnika definirani su za svaki čvor:

$$\Phi_{\text{sto;ls;i}} = A_{\text{edge;i}} \cdot H_{\text{sto;edge;ls}} \cdot (\vartheta_{\text{sto;vol;i}} - \vartheta_{\text{sto;amb}}) \quad (1)$$

Unutar komponente mogu se definirati više različitih mlazova fluida koji ulaze i izlaze iz spremnika. Korisnik određuje čvor u kojem mlaz ulazi u spremnik i čvor u kojem mlaz izlazi. Za svaki ulaz treba biti definiran odgovarajući izlaz pri čemu su maseni protoci koji ulaze i izlaze iz spremnika u sparenim priključcima jednaki. Ulazne veličine komponente su temperatura mlaza na ulazu u spremnik i maseni protok mlaza, a temperatura izlaznog mlaza jednaka je u odgovarajućem vremenskom koraku simulacije temperaturi čvora u kojem je smješten izlazni priključak. U komponenti je protok mlaza modeliran na način da se mlaz u potpunosti izmiješa sa fluidom u čvoru u koji ustrujava. Zatim jednaki maseni protok temperature jednake temperaturi tog čvora ustrujava u sljedeći čvor s kojim se također miješa. Postupak se ponavlja do čvora u kojem je smješten izlazni priključak gdje mlaz izlazi iz spremnika. Neto iznos energije koji pojedini čvor i izmjeni sa susjednim čvorovima zbog prostrujavanja mlaza fluida iznosi:

$$\Phi_{\text{flow;i-1}} - \Phi_{\text{flow;i+1}} = \dot{m}_W \cdot c_w \cdot (\vartheta_{\text{sto;vol;i-1}} - \vartheta_{\text{sto;vol;i}}) \quad (2)$$

U modelu analiziranog sustava definiran je jedan mlaz kojim se simulira odvođenje vode koja se koristi kao potrošna topla voda i dovođenje svježije vode kojom se nadoknađuje odvedena voda. Maseni protok vode koji se odvodi iz spremnika ovisi o potrebnoj toplinskoj energiji u odnosu na svježiju vodu i temperaturi mlaza na izlazu iz spremnika pri čemu je pretpostavljeno miješanje mlaza iz spremnika sa svježom vodom kako bi se postigla tražena temperatura PTV-a. Pri istim energetske potrebama za PTV, povećanjem temperature mlaza na izlazu iz spremnika u odnosu na minimalnu traženu temperaturu PTV-a smanjuje se protok mlaza koji se odvodi iz spremnika uz povećanje udjela hladne vode s kojom se mlaz miješa. Ulazni priključak smješten je pri dnu spremnika, a izlazni pri vrhu. Postupak prestrujavanja fluida između ulaznog i izlaznog priključka prikazan je na Slici 6.



Slika 6. Prikaz izvlačenja PTV-a i nadopunjavanja spremnika svježom vodom

Tijekom eksploatacije modeliranog sustava može se dogoditi da su uvjeti u spremniku toplinski nestabilni pri čemu je čvor više temperature ispod čvora niže temperature. Takve situacije u analiziranom su sustavu posljedica dovođenja toplinske energije izmjenjivačem topline pri

čemu temperatura čvora u kojem je izmjenjivač smješten može narasti iznad temperature gornjeg čvora ili odvođenja toplinske energije pri čemu temperatura čvora padne ispod temperature donjeg čvora. U tom slučaju, čvorovi kod kojih je došlo do temperature inverzije poprimaju zajedničku temperaturu koja proizlazi iz njihovog adijabatskog miješanja. Toplinski tok koji čvor i izmijeni s čvorom jednakog volumena j s kojim graniči u stanju temperature inverzije iznosi:

$$\Phi_{\text{mix};i} = \frac{V_{\text{sto;vol};i} \cdot \rho_w \cdot c_w}{t_{\text{ci}}} \cdot \frac{\vartheta_{\text{sto;vol};j} - \vartheta_{\text{sto;vol};i}}{2} \quad (3)$$

Uzevši u obzir sve opisane mehanizme izmjene topline pojedinog čvora okolinom, energijska bilanca postavljena na pojedini čvor glasi:

$$m_i \cdot c_w \cdot \frac{d\vartheta_{\text{sto;vol};i}}{dt} = \Phi_{\text{hx};i} + \Phi_{\text{mix};i} + \Phi_{\text{cond};i} - \Phi_{\text{sto;ls};i} + \Phi_{\text{flow};i-1} - \Phi_{\text{flow};i+1} \quad (4)$$

gdje veličina $\Phi_{\text{hx};i}$ obuhvaća sve indirektnu izmjenu toplinskih tokova izmjenjivačima topline koje su definirane kao ulazne veličine dodatne topline.

Jednadžba svakog čvora zatim se prevodi u oblik:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = a\vartheta + b \quad (5)$$

gdje član b obuhvaća i temperature ostalih čvorova u odgovarajućem vremenskom koraku. Da bi se jednadžba (5) mogla riješiti, temperature koje čine član b smatraju se konstantnima tijekom jednog vremenskog koraka. S takvim konstantnim vrijednostima ostalih temperatura rješava se diferencijalna jednadžba za svaki čvor nakon čega se računaju nove temperature po čvorovima i proces se iterativno ponavlja dok ne dođe do konvergencije rješenja.

2.2. Model solarnog kolektora [5]

Komponenta *Type 1a – Flat-plate collector* modelira rad toplovodnog solarnog kolektora ili niza serijski i paralelno spojenih kolektora. Toplinska učinkovitost niza kolektora ovisi o broju modula solarnih kolektora u seriji i o karakteristikama modula. Jednadžba koja opisuje učinkovitost solarnog kolektora glasi:

$$\eta_{\text{col}} = F_R \cdot (\tau\alpha)_n - F_R \cdot U_L \cdot \frac{(\vartheta_{\text{col;avg}} - \vartheta_e)}{I_{\text{sol}}} - F_R \cdot U_{L;\vartheta} \cdot \frac{(\vartheta_{\text{col;avg}} - \vartheta_e)^2}{I_{\text{sol}}} \quad (6)$$

Jednadžba (6) može se preformulirati kao:

$$\eta_{\text{col}} = \eta_0 - a_1 \cdot \frac{(\vartheta_{\text{col;avg}} - \vartheta_e)}{I_{\text{sol}}} - a_2 \cdot \frac{(\vartheta_{\text{col;avg}} - \vartheta_e)^2}{I_{\text{sol}}} \quad (7)$$

pri čemu je učinkovitost kolektora opisana kvadratnom jednadžbom u ovisnosti o omjeru razlike temperature fluida u kolektoru i vanjskog zraka i intenziteta sunčevog zračenja. Kao referentna temperatura fluida u kolektoru može se koristiti temperatura na ulazu, izlazu ili prosječna temperatura u kolektoru. U ovom modelu korištena je prosječna temperatura fluida u kolektoru, što je uobičajena praksa u Europi. Parametri η_0 , a_1 i a_2 određuju se standardiziranim testovima učinkovitosti kolektora i parametri su komponente *Type 1a* koje je potrebno unijeti prije simulacije.

Jednadžba učinkovitosti (7) vrijedi za referentni maseni protok solarnog kruga korišten kod testiranja. Ukoliko se protok tijekom korištenja sustava razlikuje od referentnog, unutar komponente se izvršava korekcija parametara η_0 , a_1 i a_2 faktorom r_1 . Ukoliko je više modula kolektora spojeno u seriju, parametri se modificiraju faktorom r_2 . Proračun faktora r_1 i r_2 dan je u [5].

Testovi kolektora obično se izvode po vedrom vremenu pri normalnom kutu upada zračenja. Ako kut upada nije okomit, potrebno je modificirati vrijednost η_0 omjerom umnoška apsorpcije i propusnosti pri stvarnom kutu upada i pri normalnom kutu upada. Kako bi učinkovitost kolektora bila jednaka onoj korištenoj u proračunu prema normi, faktor η_0 korigiran je faktorom promjene kuta upadnog zračenja za kut upada od 50° $K_{\text{hem}}(50^\circ)$.

Toplina koju solarni kolektor apsorbira definirana je:

$$Q_{\text{sol,col,out}} = A_{\text{sol}} \cdot I_{\text{sol}} \cdot \eta_{\text{col}} = \dot{m}_{\text{sol}} \cdot c_w \cdot (\vartheta_{\text{sol,col,out}} - \vartheta_{\text{sol,loop,in}}) \quad (8)$$

Potrebno je obratiti pažnju je su li parametri učinkovitosti kolektora definirani prema bruto površini kolektora ili prema korisnoj površini kolektora. U Europi se učinkovitost uobičajeno definira prema korisnoj površini kolektora.

2.3. Pozivanje *MATLAB* skripte

Komponenta *Type 155* poziva *MATLAB* skriptu kojom su modelirani regulacija pumpe solarnog kruga, regulacija rada pomoćnog grijača i izmjenjivač topline solarnog kruga te kruga grijanja. *MATLAB* skripta korištena je i za unos rubnih uvjeta proračuna, proračun potrebnog masenog protoka vode koji se izvlači iz spremnika za potrebe PTV-a, proračun gubitaka cjevovoda solarnog kruga te za spremanje rezultata simulacije.

2.3.1. Regulacija solarnog kruga

Rad pumpe solarnog kruga upravljan je dvopoložajnom regulacijom u ovisnosti o razlici temperature na izlazu iz kolektora i u čvoru spremnika u kojem se nalazi izmjenjivač topline solarnog kruga. Kako bi se spriječilo neprestano paljenje i gašenje pumpe, ona se pali kad je razlika temperatura $\vartheta_{\text{sol;col;out}}$ i $\vartheta_{\text{sto;vol;1}}$ veća od iznosa $\Delta\vartheta_{\text{sol;pmp;on}}$, a gasi se kad razlika padne ispod $\Delta\vartheta_{\text{sol;pmp;off}}$. Maseni protok vode u solarnom krugu konstantan je kad pumpa radi i iznosi \dot{m}_{sol} . Gubici cjevovoda solarnog kruga računaju se prema:

$$\Phi_{\text{sol;loop;ls}} = H_{\text{sol;loop}} \cdot (\vartheta_{\text{sol;col;out}} - \vartheta_{\text{sol;amb}}) \quad (9)$$

Kao posljedica gubitaka cjevovoda, temperatura vode na izlazu iz solarnog kruga iznosi:

$$\vartheta_{\text{sol;loop;out}} = \vartheta_{\text{sol;col;out}} - \frac{\Phi_{\text{sol;loop;ls}}}{\dot{m}_{\text{sol}} \cdot c_w} \quad (10)$$

Toplinski tok koji pomoću izmjenjivača topline solarnog kruga fluid solarnog kruga predaje spremniku iznosi:

$$\Phi_{\text{sto;sol;in}} = H_{\text{sol;exh}} \cdot \left(\frac{\vartheta_{\text{sol;loop;out}} + \vartheta_{\text{sol;loop;in}}}{2} - \vartheta_{\text{sto;vol;1}} \right) \quad (11)$$

Temperatura fluida solarnog kruga nakon predaje toplinskog toka spremniku iznosi:

$$\vartheta_{\text{sol;loop;in}} = \vartheta_{\text{sol;loop;out}} - \frac{\Phi_{\text{sto;sol;in}}}{\dot{m}_{\text{sol}} \cdot c_w} \quad (12)$$

Zbog međusobne ovisnosti temperature polaza solarnog kruga $\vartheta_{\text{sol;loop;in}}$ i toplinskog toka koji se predaje spremniku $\Phi_{\text{sto;sol;in}}$ proračun je iterativan.

2.3.2. Regulacija pomoćnog grijača

Pomoćni grijač reguliran je dvopoložajnom regulacijom prema temperaturi vode u čvoru u kojem se nalazi izmjenjivač topline pomoćnog grijača. Kada temperatura u spremniku padne ispod donje razine regulacijskog raspona pomoćnog grijača $\vartheta_{\text{sto;bu;set}} - \Delta\vartheta_{\text{sto;bu;set;low}}$, grijač

se pali i radi sve dok temperatura u spremniku ne dostigne gornju razinu regulacijskog raspona $\vartheta_{sto;bu;set} + \Delta\vartheta_{sto;bu;set;high}$. Kada pomoćni grijač radi, predaje spremniku maksimalni toplinski tok ovisan o snazi grijača $\Phi_{sto, bu}$. Pretpostavljena je idealna izmjena topline na izmjenjivaču topline pomoćnog grijača pri čemu se u svakom vremenskom koraku spremniku predaje ukupna proizvedena toplinska energija pomoćnog grijača. .

2.3.3. Odvedeni maseni protok vode za potrebe PTV-a i energija za potrebe grijanja

Voda za potrebe sustava PTV-a uzima se iz spremnika s njegovog vrha, odnosno iz najvišeg čvora 4 i nadopunjuje se svježom vodom temperature $\vartheta_{W,cold}$ na dnu spremnika, odnosno u čvor 1. Maseni protok vode koji se odvodi iz spremnika i istovremeno nadopunjuje svježom iznosi:

$$\dot{m}_W = \frac{\Phi_{W,dis,out,req}}{c_W(\vartheta_{sto,vol,4} - \vartheta_{W,cold})} \quad (13)$$

U slučaju da je temperatura vode u čvoru 4 $\vartheta_{sto,vol,4}$ niža od minimalne potrebne temperature PTV-a $\vartheta_{W,out,min}$, potrebe za PTV-om nisu zadovoljene uz pretpostavku da je maseni protok PTV-a u tom vremenskom koraku jednak nuli. Kako bi se to spriječilo, potrebno je postaviti dovoljno visoku postavnu temperaturu spremnika.

Toplinski tok za potrebe sustava grijanja odvodi se iz spremnika u slučaju da je temperatura vode u čvoru u kojem je smješten izmjenjivač topline sustava grijanja viša ili jednaka potrebnoj. Potrebna temperatura vode u čvoru je temperatura polaza sustava grijanja uvećana za temperaturnu razliku na izmjenjivaču topline sustava grijanja:

$$\vartheta_{sto,H,min} = \vartheta_{H,out,min} + \frac{\Phi_{H,dis,out,req}}{H_{sto,H,exh}} \quad (14)$$

$$\vartheta_{sto,vol,3} \geq \vartheta_{sto,H,min}$$

Ako uvjet propisan nejednadžbom (14) nije ispunjen, zbog nedovoljne temperaturne razlike na izmjenjivaču topline ne dolazi do predaje toplinskog toka iz spremnika prema podsustavu grijanja i potrebe za grijanjem ostaju nezadovoljene.

2.3.4. Ulazni podaci i spremanje rezultata simulacije

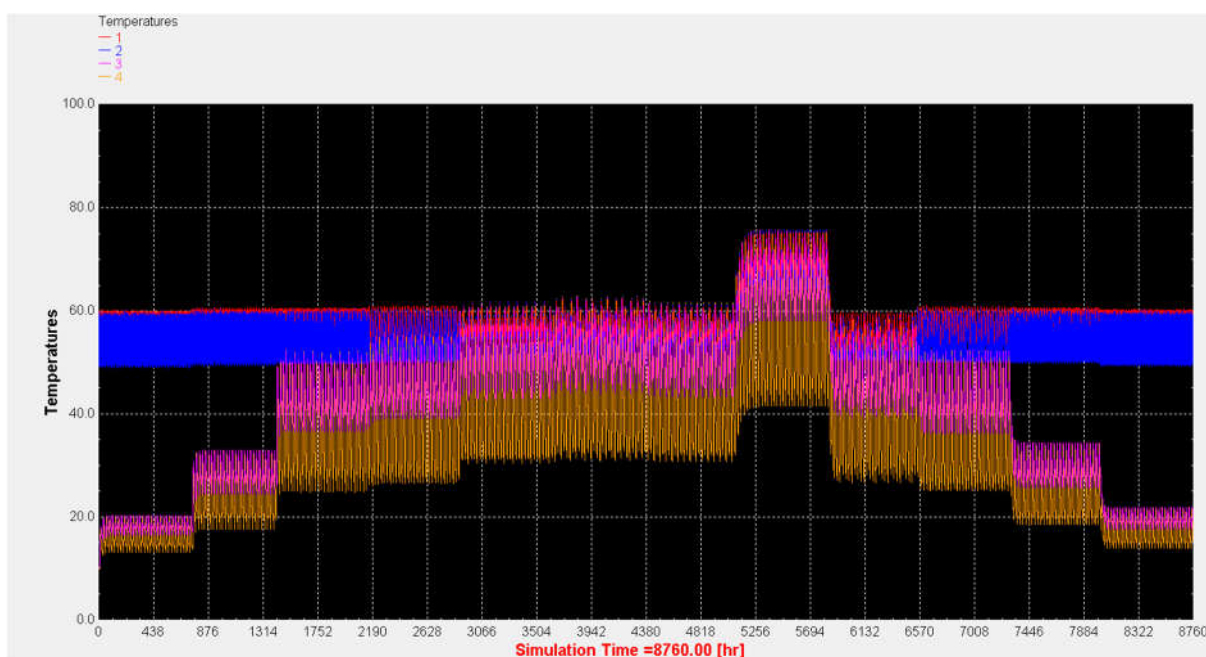
Dostupni ulazni podaci satnog su vremenskog koraka te ih je potrebno prilagoditi za simulacije sa finijim vremenskim koracima. Energetske veličine $Q_{W,dis,out,req}$ i $Q_{H,dis,out,req}$ transformirane su u prosječne toplinske tokove po svakom satnom vremenskom koraku.

Vrijednosti temperature vanjskog zraka ϑ_e , intenziteta solarnog zračenja I_{sol} te toplinskih tokova $\Phi_{W;dis;out;req}$ i $\Phi_{H;dis;out;req}$ kroz svaki vremenski korak unutar jednog sata jednake su dostupnim vrijednostima u tom satu.

Tijekom izvođenja simulacije, spremaju se rezultati za svaki vremenski korak. Nakon završetka simulacije, računaju se prosječne, odnosno sumarne vrijednosti rezultata na mjesečnoj i godišnjoj razini te se, zajedno s rezultatima za svaki vremenski korak, spremaju u *Excel* formatu.

2.4. Kontrola rezultata tijekom simulacije

Komponenta *Type 65d* služi za prikaz rezultata tijekom izvođenja simulacije i korištena je za kontrolu rezultata tijekom simulacije. Komponentom su prikazivane temperature čvorova unutar spremnika i trenutni vremenski korak za koji se provodi simulacija. Primjer prikaza rezultata nakon završetka simulacije pomoću komponente *Type 65d* dan je na Slici 7. Detaljniji rezultati proračuna nakon izvođenja simulacije koji se spremaju pomoću *MATLAB* skripte u *Excel* formatu i dani su u poglavljima 5 i 6.



Slika 7. Temperature u spremniku prikazane komponentom *Type 65d*

3. OPIS KORIŠTENIH NORMI I NJIHOVA PRIMJENA NA PRORAČUN SUSTAVA

U ovom poglavlju dan je pregled normi HRN EN 15316-5:2017 koja opisuje proračun akumulacijskog spremnika i HRN EN 15316-4-3:2017 koja opisuje proračun solarnog toplovodnog sustava. Norma HRN EN 15316-5:2017 sadrži dvije metode proračuna akumulacijskih spremnika: *metodu A* koja opisuje spremnik modeliran sa više homogenih segmenata jednakih volumena i pojednostavljenu *metodu B* koja opisuje spremnik modeliran kao jedan volumen homogene temperature. Norma HRN EN 15316-4-3:2017 sadrži tri metode proračuna toplovodnih solarnih sustava i tri metode proračuna fotonaponskih solarnih sustava od kojih su u ovom radu korištene dvije metode proračuna toplovodnih sustava: *metoda 2* s mjesečnim vremenskim korakom i *metoda 3* sa satnim vremenskim korakom.

Na kraju opisa svake metode dani su komentari s predloženim izmjenama proračunskih procedura i jednadžbi u svrhu povećanja primjenjivosti normi na proračun promatranog sustava. Nakon opisa svih korištenih metoda iz normi, prikazan je način na koji su za proračun sustava korištene kombinacije opisanih metoda.

3.1. HRN EN 15316-5:2017 [6]

Svrha norme *HRN EN 15316-5:2017 Energy performance of buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies — Part 5: Space heating and DHW storage systems (not cooling)* energetski je proračun toplovodnih podsustava skladištenja energije za grijanje, potrošnu toplu vodu ili njihove kombinacije. Norma ne pokriva dimenzioniranje i inspekciju podsustava skladištenja energije.

U normi su opisana dva načina energetskog proračuna akumulacijskih toplovodnih spremnika: *metoda A* koja uzima u obzir temperaturnu stratifikaciju spremnika sa satnim vremenskim korakom te *metoda B* koja opisuje pojednostavljeni proračun sa homogenom temperaturom spremnika za koji vremenski korak proračuna može biti satni, mjesečni, godišnji ili na razini razreda (*bin*).

3.1.1. Metoda A

Metoda A bazira se na energetskoj jednadžbi postavljenoj na segment homogene temperature na koje je spremnik podijeljen po visini zbog modeliranja temperaturne stratifikacije:

$$m_i \cdot c_p \cdot (\vartheta_{t+1,i} - \vartheta_{t,i}) = Q_{t+1,i} + \Delta m_t \cdot c_p \cdot (\vartheta_{t,i-1} - \vartheta_{t,i}) - Q_{sto,ls,i} \quad (15)$$

Član s lijeve strane jednadžbe (15) opisuje vremensku promjenu entalpije unutar promatranog segmenta spremnika, prvi član s desne strane opisuje unos ili odvođenje energije iz segmenta pomoću izmjenjivača topline, drugi opisuje promjenu entalpije zbog izmjene tvari sa segmentima sa kojima promatrani volumen graniči, a posljednji pribrojnik opisuje toplinske gubitke segmenta prema okolišu. Normom je zanemarena izmjena topline provođenjem između susjednih segmenata spremnika.

Proračun spremnika prema *metodi A* opisan je u 9 koraka. Kada temperatura spremnika u trenutnom vremenskom koraku ima utjecaj na energetske veličine proračuna koje mijenjaju temperaturu spremnika, kao što je slučaj sa toplinskom energijom koju solarni kolektor predaje spremniku, a na koju utječe temperatura vode u spremniku, unutar promatranog vremenskog intervala proračun zahtjeva iterativno rješavanje.

U proračunu se pretpostavlja da su svojstva fluida konstantna. Volumeni svakog segmenta na koji je spremnik podijeljen trebaju biti jednaki. Priključak kojim se voda direktno uzima iz spremnika treba biti smješten na najvišem volumenu spremnika.

3.1.1.1. Korak 0 - Inicijalizacija

Na početku proračuna potrebno je definirati početne temperature svakog segmenta spremnika. Početne temperature segmenata grijanih pomoćnim grijačem postavljene su na postavnu temperaturu grijača, dok su početne temperature volumena ispod izmjenjivača topline pomoćnog grijača postavljene na temperaturu svježje vode.

3.1.1.2. Korak 2 – Volumen vode koja se isporučuje iz spremnika za potrebe potrošne tople vode

Volumen vode koji je potrebno isporučiti iz spremnika proračunava se prema energiji koju je potrebno predati u podsustav razvoda PTV-a uz uvjet da je odvedena voda više temperature od minimalne temperature PTV-a $\vartheta_{W;out,min}$. Pretpostavljeno je da se voda odvedena iz spremnika miješa sa svježom vodom kako bi se PTV isporučio pri temperaturi $\vartheta_{W;out,min}$.

Voda se odvodi počevši od najvišeg homogenog segmenta spremnika u kojem je smješten priključak na podsustav razvoda PTV-a, a ukoliko taj volumen nije dovoljan da bi se zadovoljile potrebe, voda se oduzima iz sljedećeg segmenta ispod tog, pod uvjetom da je temperatura vode u segmentu viša od minimalne $\vartheta_{W;out,min}$. Postupak se ponavlja za svaki sljedeći volumen sve dok potreba za PTV-om nije zadovoljena ili dok uvjet minimalne temperature vode nije prekršen.

Ako je temperatura $\vartheta_{sto;vol,i}$ viša od temperature $\vartheta_{W;out,min}$, obujam vode koji se oduzima iz spremnika iznosi:

$$V_{sto;use;W;i} = \frac{Q_{W;dis;out;req}}{\rho_w \cdot c_w \cdot (\vartheta_{sto;vol,i} - \vartheta_{W;cold})} \quad (16)$$

Ako je izračunati $V_{sto;use;W;i}$ veći od volumena segmenta $V_{sto;vol,i}$, vrijedi:

$$V_{sto;use;W;i} = V_{sto;vol,i} \quad (17)$$

pri čemu se energija potrebna za PTV $Q_{W;dis;out;req}$ umanjuje za energiju odvedenu iz segmenta i :

$$Q_{sto;W;dis;i} = \rho_w \cdot c_w \cdot V_{sto;vol,i} \cdot (\vartheta_{sto;vol,i} - \vartheta_{W;cold}) \quad (18)$$

Opisani postupak ponavlja se za svaki sljedeći segment. U slučaju da je preostala potrebna energija za PTV $Q_{W;dis;out;req}$ jednaka nuli, ili je temperatura vode u spremniku niža od potrebne $\vartheta_{W;out,min}$, vrijedi:

$$\begin{aligned} Q_{sto;W;dis;i} &= 0 \\ V_{sto;use;W;i} &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

Ako nakon proračuna za najniži segment preostane potrebne energije $Q_{W;dis;out;req}$, ta preostala energija ostaje neisporučena i potreba energije za potrošnu toplu vodu nije u potpunosti zadovoljena. Ukupno isporučeni volumen vode iz spremnika i ukupna energija isporučena iz spremnika iznose:

$$\begin{aligned} V_{sto;use;W} &= \sum_{i=1}^{N_{vol}} V_{sto;use;W;i} \\ Q_{sto;W;dis} &= \sum_{i=1}^{N_{vol}} Q_{sto;W;dis;i} \end{aligned} \quad (20)$$

3.1.1.3. Korak 3 – Temperatura spremnika nakon isporuke potrošne tople vode

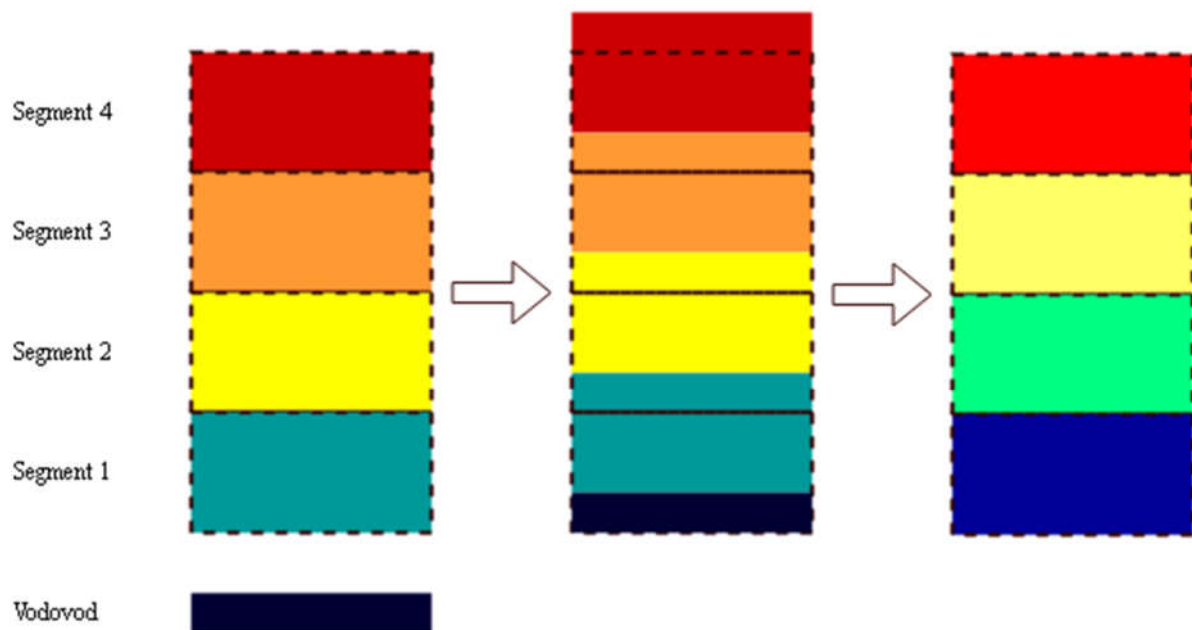
Nakon isporučivanja potrošne tople vode iz spremnika, pretpostavlja se pomicanje cjelokupnog preostalog volumena vode u spremniku prema vrhu spremnika, dok se volumen pri dnu spremnika, a koji je jednak volumenu isporučenom za potrebe PTV-a $V_{sto;use;W}$, nadopunjuje svježom vodom temperature $\vartheta_{W,cold}$. Pri tome voda koja završi u svakom zamišljenom, prostorno fiksiranom, segmentu spremnika i poprima homogenu temperaturu nastalu adijabatskim miješanjem vode u segmentu i . Opisani proces shematski je prikazan na Slici 8:

U slučaju da je volumen isporučene vode $V_{sto;use;W}$ veći od volumena jednog segmenta spremnika $V_{sto;vol;i}$, temperatura svakog segmenta spremnika postavlja se jednakom temperaturi segmenta ispod njega, a temperatura najnižeg segmenta postavlja se jednakom temperaturi svježije vode.

$$\begin{aligned} \vartheta_{sto;vol;i} &= \vartheta_{sto;vol;i-1} \\ \vartheta_{sto;vol;i} &= \vartheta_{W,cold} \end{aligned} \quad (21)$$

Preostali iznos vode koju je potrebno nadopuniti $V_{sto;use;W}$ umanjuje se za upravo nadopunjeni iznos volumena segmenta $V_{sto;vol;i}$.

$$V_{sto;use;W} = V_{sto;use;W} - V_{sto;vol;i} \quad (22)$$



Slika 8. Shematski prikaz temperatura segmenata spremnika prije i nakon isporuke potrošne tople vode

Opisani postupak ponavlja se sve dok preostali iznos vode koji je potrebno nadopuniti ne bude manji od volumena jednog segmenta spremnika $V_{sto;vol;i}$. U tom slučaju, temperatura svakog segmenta i računa se:

$$\vartheta_{sto;vol;i} = \frac{\vartheta_{sto;vol;i-1} \cdot V_{sto;use;W} + \vartheta_{sto;vol;i} \cdot (V_{sto;vol;i} - V_{sto;use;W})}{V_{sto;vol;i}} \quad (23)$$

pri čemu za najniži volumen $i = 1$ vrijedi:

$$\vartheta_{sto;vol;i-1} = \vartheta_{W;cold} \quad (24)$$

3.1.1.4. Koraci 4 i 5

Koraci 4 i 5 opisuju proračun za slučaj kad se iz spremnika direktno isporučuje voda u podsustav razvoda za potrebe grijanja što u ovom sustavu nije slučaj. Procedure proračuna za korake 4 i 5 ekvivalentne su procedurama kod koraka 2 i 3.

3.1.1.5. Korak 6 – Indirektna predaja ili oduzimanje energije iz spremnika

Korak 6 koristi se za proračun izmjene energije spremnika sa vanjskim ili unutarnjim izmjenjivačem topline. U slučaju odvođenja topline izmjenjivačem smještenim u više homogenih segmenata, proračun se provodi za najviši segment, a u slučaju dovođenja za najniži u kojem se izmjenjivač nalazi. Korištena je procedura prema Dodatku D norme.

Kod odvođenja energije, energija dostupna za odvođenje iz homogenog segmenta i računa se prema izrazu:

$$Q_{sto,out;i} = \rho_w \cdot c_w \cdot V_{sto,vol;i} \cdot (\vartheta_{sto,vol;i} - \vartheta_{sto,H,min}) \quad (25)$$

Kod ovog sustava, izmjenjivačem topline odvodi se toplina potrebna za grijanje prostora pri čemu je temperatura $\vartheta_{sto,H,out}$ temperatura polaza sustava grijanja uvećana za temperaturnu razliku na izmjenjivaču topline podsustava grijanja za čiji proračun se koristi modul *izmjenjivač topline* opisan u nastavku.

$$\vartheta_{sto,H,min} = \vartheta_{H,out,min} + \Delta\vartheta_{H,sto,exh} \quad (26)$$

Ukupna energija dostupna za odvođenje od spremnika smještenog u volumenu N suma je dostupne energije od najnižeg volumena do volumena N .

$$Q_{sto,out,max} = \sum_{i=1}^N Q_{sto,out;i} \quad (27)$$

Ukoliko je toplina koju spremnik treba isporučiti $Q_{sto,out,req}$ veća od energije koja je dostupna za odvođenje iz segmenta i , potrebna toplina umanjuje se za iznos $Q_{sto,out;i}$, a temperatura segmenta i postavlja se na iznos $\vartheta_{x,out,min}$. Postupak se ponavlja za svaki niži segment sve dok preostala toplina $Q_{sto,out,req}$ ne bude manja od $Q_{sto,out;i}$ ili dok se isporuči sva dostupna energija $Q_{sto,out,max}$. U slučaju kad je preostala toplina koju treba isporučiti manja od dostupne u segmentu i , sva se potrebna toplina isporuči, a temperatura segmenta i proračunava se prema:

$$\vartheta_{sto,vol;i} = \vartheta_{sto,vol,i} - \frac{Q_{sto,out,req}}{\rho_w \cdot c_w \cdot V_{sto,vol;i}} \quad (28)$$

Ako je energija $Q_{sto,out,req}$ veća od ukupne dostupne $Q_{sto,out,max}$, njihova razlika smatra se neisporučenom.

U slučaju dovođenja topline, kapacitet segmenta i za primanje topline računa se:

$$Q_{sto,in;i} = \rho_w \cdot c_w \cdot V_{sto,vol;i} \cdot (\vartheta_{sto,set} - \vartheta_{sto,vol;i}) \quad (29)$$

Za postavnu temperaturu u slučaju postojanja regulacijskog raspona temperature uzima se gornja granica temperaturnog raspona. Ukupni kapacitet spremnika za primanje topline od

izmjenjivača smještenog u segmenta N je suma svih kapaciteta od segmenta N do vrha spremnika.

$$Q_{\text{sto};\text{in};\text{max}} = \sum_{i=N}^{N_{\text{vol}}} Q_{\text{sto};\text{in};i} \quad (30)$$

Ako je energija koju spremnik treba akumulirati $Q_{\text{sto};\text{in};\text{req}}$ veća od dostupnog kapaciteta segmenta i $Q_{\text{sto};\text{in};i}$, potrebna energija smanjuje se za iznos $Q_{\text{sto};\text{in};i}$, a temperatura segmenta i postavlja se na iznos $\vartheta_{\text{sto};\text{set}}$. Postupak se ponavlja za svaki viši segment sve dok preostala energija $Q_{\text{sto};\text{in};\text{req}}$ ne bude manja od $Q_{\text{sto};\text{in};i}$ ili dok se ne akumulira maksimalna količina energije $Q_{\text{sto};\text{in};\text{max}}$. U slučaju kad je preostala energija koju treba akumulirati manja od kapaciteta segmenta i , sva se potrebna energija akumulira, a temperatura segmenta i proračunava se prema:

$$\vartheta_{\text{sto};\text{vol};i} = \vartheta_{\text{sto};\text{vol};i} + \frac{Q_{\text{sto};\text{in};\text{req}}}{\rho_w \cdot c_w \cdot V_{\text{sto};\text{vol};i}} \quad (31)$$

Ako je energija $Q_{\text{sto};\text{in};\text{req}}$ veća od ukupnog kapaciteta $Q_{\text{sto};\text{in};\text{max}}$, njihova razlika se smatra viškom i ne predaje se spremniku.

Ako se u istom volumenu nalazi izmjenjivač topline koji predaje toplinu spremniku i izmjenjivač koji oduzima toplinu iz spremnika, računa se razlika energije koju treba primiti i energije koju treba oduzeti, pod uvjetom da je temperatura segmenta N niža od postavne temperature $\vartheta_{\text{sto};\text{set}}$, a viša od minimalne polazne temperature $\vartheta_{\text{sto};\text{H};\text{min}}$. U slučaju da je veća energija koju spremnik treba isporučiti $Q_{\text{sto};\text{out};\text{req}}$, razlika energija oduzima se spremniku na prethodno opisan način, a u slučaju da je veća energija koju je potrebno predati spremniku, razlika se predaje na prethodno opisani način. Ako je temperatura segmenta N niža od minimalne polazne temperature, energija koju spremnik isporučuje $Q_{\text{sto};\text{out}}$ jednaka je nuli, a ako je viša od postavne temperature, energija koju spremnik prima $Q_{\text{sto};\text{in}}$ jednaka je nuli.

3.1.1.6. Korak 7 – Prirodna stratifikacija

Usljed dovodenja i odvođenja topline spremniku, može se dogoditi da je temperatura vode u nekom homogenom segmentu i viša od temperature segmenta $i + 1$ koji se nalazi iznad segmenta i . Zbog raspodjele gustoća fluida po visini, takvo stanje je nestabilno zbog čega je pretpostavljeno adijabatsko miješanje njihovih sadržaja pri čemu segmenti poprimaju zajedničku temperaturu:

$$\vartheta_{\text{sto;vol};i} = \vartheta_{\text{sto;vol};i+1} = \frac{\vartheta_{\text{sto;vol};i} \cdot V_{\text{sto;vol};i} + \vartheta_{\text{sto;vol};i+1} \cdot V_{\text{sto;vol};i+1}}{V_{\text{sto;vol};i} + V_{\text{sto;vol};i+1}} \quad (32)$$

Proces se iterativno ponavlja sve dok temperaturni profil fluida u spremniku ne postane stabilan.

3.1.1.7. Korak 8 – Toplinski gubici i temperatura spremnika na kraju vremenskog koraka

Za svaki segment i toplinski gubici računaju se:

$$Q_{\text{sto;ls;vol};i} = f_{\text{sto;bac;acc}} \cdot f_{\text{sto;dis;ls}} \cdot \frac{V_{\text{sto;vol};i}}{V_{\text{sto;tot}}} \cdot H_{\text{sto;ls}} \cdot (\vartheta_{\text{sto;vol};i} - \vartheta_{\text{sto;amb}}) \cdot t_{\text{ci}} \quad (33)$$

Konačna temperatura svakog segmenta i umanjuje se uslijed toplinskih gubitaka za iznos:

$$\Delta\vartheta_{\text{sto;vol};i} = -\frac{Q_{\text{sto;ls;vol};i}}{\rho_w \cdot c_w \cdot V_{\text{sto;vol};i}} \quad (34)$$

3.1.1.8. Izmjenjivač topline

Kod indirektno izmjene topline izmjenjivačem topline između vode u spremniku i struje u izmjenjivaču nužno postoji određena temperaturna razlika koja je definirana:

$$\Delta\vartheta_{\text{exh}} = -\frac{Q_{\text{exh}}}{H_{\text{exh}} \cdot t_{\text{ci}}} \quad (35)$$

Temperatura struje na izlazu iz izmjenjivača topline ovisi o temperaturi segmenta spremnika u kojem se nalazi izmjenjivač i o izračunatoj temperaturnoj razlici na izmjenjivaču.

$$\vartheta_{\text{exh;out}} = \vartheta_{\text{sto;vol};i} + \Delta\vartheta_{\text{exh}} \quad (36)$$

Da bi se potreban iznos topline mogao izmjenjivačem topline predati spremniku, temperatura struje na izlazu iz izmjenjivača treba biti viša ili jednaka temperaturi segmenta u kojem se izmjenjivač nalazi $\vartheta_{\text{sto;vol};i}$, a da bi se potreban iznos topline izmjenjivačem mogao oduzeti iz spremnika, temperatura na izlazu treba biti manja ili jednaka temperaturi segmenta $\vartheta_{\text{sto;vol};i}$.

3.1.1.9. Komentar izmjena metode

Kod *koraka 0 – inicijalizacija* normom je propisano da je početno temperaturno stanje čitavog spremnika jednako postavnoj temperaturi spremnika. U korištenom proračunu inicijalizirana je realnija situacija sa temperaturom dijela spremnika koji nije grijan pomoćnim grijačem jednakom temperaturi svježje vode, a temperatura dijela spremnika grijana pomoćnim grijačem postavljena je na postavnu temperaturu pomoćnog grijača.

U *koraku 2* isporučena se energija prema normi računa u odnosu na referentnu temperaturu $\vartheta_{W;out,min}$, što je u ovom proračunu promijenjeno tako da se isporučena energija računa prema referentnoj temperaturi svježje vode $\vartheta_{W;cold}$, što odgovara slučaju opisanom u Dodatku D norme. Opis jednadžbi *koraka 2* izmijenjen je u svrhu povećane općenitosti primjene i jasnijeg prikaza. U normi su jednadžbe opisane za partikularni slučaj korištenja kod kojeg je spremnik podijeljen na četiri segmenta i prikazana je mogućnost odvođenja vode iz četvrtog te trećeg segmenta, ukoliko u četvrtom nije uskladišten dovoljan iznos energije za zadovoljenje potrebe za potrošnom toplom vodom. Jednadžbe u odlomku 3.1.1.2 pisane su na način neovisan o broju segmenata i prikazuju odvođenje energije iz svih segmenata u kojim je zadovoljen uvjet minimalne temperature PTV-a sve dok potrebe za isporučenom toplinskom energijom sustavu PTV-a nisu zadovoljene.

Kod *koraka 6* opisana je procedura proračuna prema Dodatku D norme kod koje su postavljena dodatna ograničenja na temperaturu spremnika pri kojoj je moguća izmjena potrebne količine toplinske energije s izmjenjivačima i koja detaljnije opisuje interakciju spremnika s izmjenjivačem topline u odnosu na osnovnu proceduru prema normi HRN EN 15316-5:2017. Prema Dodatku D unošenje topline izmjenjivačem može utjecati na sve segmente iznad onog u kojem je smješten izmjenjivač, a odvođenje na sve segmente ispod izmjenjivača. To omogućuje korištenje energije koja je na dovoljno visokoj temperaturi spremljena u donjim dijelovima spremnika i koja ima utjecaj na rad izmjenjivača topline zbog procesa opisanog u *koraku 7*. Kod unošenja topline u spremnik opisani pristup sprečava lokalno pregrijavanje volumena u kojem se nalazi izmjenjivač, a koje bi se tijekom izvršavanja *koraka 7* rasporedilo po segmentima iznad segmenta u kojem se nalazi izmjenjivač topline te sprečava zagrijavanje spremnika iznad postavne temperature.

U jednadžbama (23), (32) i (34) zamijenjeni su znakovi zbrajanja znakovima množenja kako bi pribrojnici u jednadžbama imali jednake mjerne jedinice. Iz jednadžbe (33) izostavljena je gustoća i specifični toplinski kapacitet da bi dimenzije bile jednake s obje strane jednakosti.

Opis slučaja 2 *koraka 8* koji opisuje situaciju u kojoj temperature volumena u spremniku premašuju postavnu temperaturu izostavljen je iz razloga što zbog modifikacija *koraka 6* takav slučaj nije moguć.

Temperatura polaza izmjenjivača topline opisana u normi nije u skladu s energetsom bilancom izmjenjivača topline. Zbog definicije veličine $\Delta\vartheta_{exh}$ kao razlike temperatura dviju struja u izmjenjivaču, a ne kao razlike ulazne i izlazne temperature jedne struje u izmjenjivaču, u jednadžbi (36) uvedena je temperatura volumena u kojem se nalazi spremnik umjesto temperature struje na ulazu u izmjenjivač.

3.1.2. Metoda B

Metoda B norme HRN EN 15316-5:2017 opisuje pojednostavljeni proračun pri kojem je temperatura čitavog spremnika u jednom vremenskom koraku homogena. Proračun je primjenjiv u slučaju slabe temperaturne stratifikacije spremnika. Vremenski korak proračuna može biti satni, mjesečni, godišnji ili prema razredima. U metodi je pretpostavljeno sekvencijalno dodavanje toplinske energije primarnog generatora topline, oduzimanje energije iz spremnika uslijed toplinskih gubitaka, za potrebe pripreme PTV-a, zatim za potrebe grijanja te naposljetku dodavanje toplinske energije pomoćnog grijača pri čemu spremnik nakon svake izmjene topline poprima neku privremenu međutemperaturu, a nakon svih izmjena toplina poprima konačnu temperaturu u tom vremenskom koraku.

3.1.2.1. Toplinski gubici

Toplinski gubici u metodi B definirani su:

$$Q_{sto;ls,tot} = f_{sto;bac;acc} \cdot f_{sto;dis;ls} \cdot H_{sto;ls} \cdot (\vartheta_{sto;bu;set} - \vartheta_{sto;amb}) \cdot t_{ci} \quad (37)$$

Toplinski gubici računaju se u odnosu na postavnu temperaturu pomoćnog grijača $\vartheta_{sto;bu;set}$.

3.1.2.2. Korak 1 – Provjera dostupne energije za pripremu PTV i grijanje

Međutemperatura nakon oduzimanja energije za potrebe PTV-a iz spremnika iznosi:

$$\vartheta_{sto;H,tmp1} = \vartheta_{sto;H;0} + \frac{Q_{X;sto;in} - Q_{W;dis;out;req} - Q_{sto;ls,tot}}{\rho_w \cdot c_w \cdot V_{sto;tot}} \quad (38)$$

U slučaju da je međutemperatura $\vartheta_{\text{sto};\text{H};\text{tmp1}}$ niža od potrebne minimalne temperature potrošne tople vode $\vartheta_{\text{W};\text{out};\text{min}}$, dostupna energija za pripremu potrošne tople vode, bez korištenja pomoćnog grijača manja je od potrebne energije za pripremu PTV-a $Q_{\text{W};\text{dis};\text{out};\text{req}}$.

$$Q_{\text{W};\text{sto};\text{out};\text{tmp}} = \min(Q_{\text{W};\text{dis};\text{out};\text{req}}, \rho_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} \cdot V_{\text{sto};\text{tot}} \cdot (\vartheta_{\text{sto};\text{H};0} - \vartheta_{\text{W};\text{out};\text{min}}) + Q_{\text{X};\text{sto};\text{in}} - Q_{\text{sto};\text{ls};\text{tot}}) \quad (39)$$

Zatim se provjerava energija dostupna za grijanje. Međutemperatura nakon oduzimanja energije za grijanje iznosi:

$$\vartheta_{\text{sto};\text{H};\text{tmp2}} = \vartheta_{\text{sto};\text{H};0} + \frac{Q_{\text{X};\text{sto};\text{in}} - Q_{\text{W};\text{sto};\text{out};\text{tmp}} - Q_{\text{H};\text{dis};\text{out};\text{req}} - Q_{\text{sto};\text{ls};\text{tot}}}{\rho_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} \cdot V_{\text{sto};\text{tot}}} \quad (40)$$

U slučaju da je međutemperatura $\vartheta_{\text{sto};\text{H};\text{tmp2}}$ niža od potrebne minimalne temperature polaza sustava grijanja $\vartheta_{\text{H};\text{out};\text{min}}$, dostupna energija za grijanje, bez korištenja pomoćnog grijača, manja je od potrebne energije grijanje $Q_{\text{H};\text{dis};\text{out};\text{req}}$.

$$Q_{\text{H};\text{sto};\text{out};\text{tmp}} = \min(Q_{\text{H};\text{dis};\text{out};\text{req}}, \rho_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} \cdot V_{\text{sto};\text{tot}} \cdot (\vartheta_{\text{sto};\text{H};0} - \vartheta_{\text{H};\text{out};\text{min}}) + Q_{\text{X};\text{sto};\text{in}} - Q_{\text{W};\text{sto};\text{out};\text{tmp}} - Q_{\text{sto};\text{ls};\text{tot}}) \quad (41)$$

3.1.2.3. Korak 2 – Energijska bilanca i temperatura spremnika bez doprinosa pomoćnog grijača

Međutemperatura spremnika nakon oduzimanja energije za pripremu PTV-a, za grijanje i toplinskih gubitaka te nakon primanja energije primarnog generatora topline, a prije doprinosa pomoćnog grijača iznosi:

$$\vartheta_{\text{sto};\text{H};\text{tmp3}} = \vartheta_{\text{sto};\text{H};0} + \frac{Q_{\text{X};\text{sto};\text{in}} - Q_{\text{W};\text{sto};\text{out};\text{tmp}} - Q_{\text{H};\text{sto};\text{out};\text{tmp}} - Q_{\text{sto};\text{ls};\text{tot}}}{\rho_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} \cdot V_{\text{sto};\text{tot}}} \quad (42)$$

Temperatura spremnika ograničena je na postavnu temperaturu primarnog generatora topline. U slučaju da je međutemperatura $\vartheta_{\text{sto};\text{H};\text{tmp3}}$ viša od postavne temperature spremnika $\vartheta_{\text{sto};\text{sol};\text{set}}$, energija koju primarni generator topline može predati spremniku ograničena je na iznos:

$$Q_{\text{X};\text{sto};\text{in};\text{tmp}} = Q_{\text{W};\text{sto};\text{out};\text{tmp}} + Q_{\text{H};\text{sto};\text{out};\text{tmp}} - Q_{\text{sto};\text{ls};\text{tot}} + \rho_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} \cdot V_{\text{sto};\text{tot}} \cdot (\vartheta_{\text{sto};\text{sol};\text{set}} - \vartheta_{\text{sto};\text{H};0}) \quad (43)$$

3.1.2.4. Korak 3 – Energija pomoćnog grijača

Pomoćni grijač proizvodi i predaje energiju spremniku u vremenskim koracima u kojima potrebe za PTV-om ili grijanjem nisu ispunjene. Potrebna energija pomoćnog grijača u tom slučaju iznosi:

$$Q_{H;sto;bu;in,tmp} = Q_{W;dis;out;req} - Q_{W;sto;out,tmp} + Q_{H;dis;out;req} - Q_{H;sto;out,tmp} + \rho_W \cdot c_W \cdot V_{sto;tot} \cdot (\vartheta_{sto;bu;set} - \vartheta_{sto;H,tmp3}) \quad (44)$$

Energija pomoćnog grijača ograničena je dostupnom snagom pomoćnog grijača.

$$Q_{H;sto;bu;in} = \min(Q_{H;sto;bu;in,tmp}, \Phi_{sto;bu} \cdot t_{ci}) \quad (45)$$

Temperatura nakon što spremnik primi energiju pomoćnog grijača iznosi:

$$\vartheta_{sto;H,tmp4} = \vartheta_{sto;H,0} + \frac{Q_{X;sto;in} - Q_{W;sto;out,tmp} - Q_{H;sto;out,tmp} - Q_{sto;ls;tot} + Q_{H;sto;bu;in}}{\rho_W \cdot c_W \cdot V_{sto;tot}} \quad (46)$$

Ako potrebe za zagrijavanjem PTV-a prije doprinosa pomoćnog grijača nisu bile zadovoljene, nakon što je pomoćni grijač predao energiju spremniku potrebno je iz spremnika oduzeti ostatak neisporučene energije. Iznos energije koja se može oduzeti za potrebe PTV-a ograničen je minimalnom temperaturom polaza PTV $\vartheta_{W;out,min}$.

$$Q_{W;sto;out,tmp2} = \min(Q_{W;sto;out;req} - Q_{W;sto;out,tmp}, \rho_W \cdot c_W \cdot V_{sto;tot} \cdot (\vartheta_{sto;H,tmp4} - \vartheta_{W;out,min})) \quad (47)$$

Temperatura spremnika nakon oduzimanja neisporučene energije za PTV iznosi:

$$\vartheta_{sto;H,tmp5} = \vartheta_{sto;H,tmp4} - \frac{Q_{W;sto;out,tmp2}}{\rho_W \cdot c_W \cdot V_{sto;tot}} \quad (48)$$

Ako potrebe za grijanjem prije doprinosa pomoćnog grijača nisu bile zadovoljene, nakon što je pomoćni grijač predao energiju spremniku i nakon što je spremniku oduzet ostatak energije za pripremu PTV-a, potrebno je oduzeti ostatak neisporučene energije za grijanje prostora. Iznos energije koja se može oduzeti za potrebe grijanja ograničen je minimalnom temperaturom polaza sustava grijanja $\vartheta_{H;out,min}$.

$$Q_{H;sto;out,tmp2} = \min(Q_{H;sto;out;req} - Q_{H;sto;out,tmp}, \rho_W \cdot c_W \cdot V_{sto;tot} \cdot (\vartheta_{sto;H,tmp5} - \vartheta_{H;out,min})) \quad (49)$$

Konačna temperatura spremnika u trenutnom vremenskom koraku dobije se oduzimanjem neisporučene energije za grijanje iz spremnika:

$$\vartheta_{\text{sto};H} = \vartheta_{\text{sto};H;\text{tmp5}} - \frac{Q_{H;\text{sto};\text{out};\text{tmp2}}}{\rho_W \cdot c_W \cdot V_{\text{sto};\text{tot}}} \quad (50)$$

Ukupno isporučena energija za potrebe zagrijavanja PTV-a iznosi:

$$Q_{\text{sto};W;\text{dis}} = Q_{W;\text{sto};\text{out};\text{tmp}} + Q_{W;\text{sto};\text{out};\text{tmp2}} \quad (51)$$

Ukupno isporučena energija za potrebe grijanja iznosi:

$$Q_{\text{sto};H;\text{dis}} = Q_{H;\text{sto};\text{out};\text{tmp}} + Q_{H;\text{sto};\text{out};\text{tmp2}} \quad (52)$$

Ako energije $Q_{\text{sto};W;\text{dis}}$ i $Q_{\text{sto};H;\text{dis}}$ nisu jednake energijama $Q_{H;\text{sto};\text{out};\text{req}}$ i $Q_{W;\text{dis};\text{out};\text{req}}$, njihove razlike smatraju se neisporučenima.

3.1.2.5. Komentar izmjena metode

S obzirom na to da se toplinski gubici spremnika koriste u svim koracima proračuna *metode B*, proračun toplinskih gubitaka spremnika prikazan je i izvršen za svaki vremenski korak na početku *metode B* za razliku od norme gdje je dan na kraju metode. To je moguće jer se toplinski gubici računaju prema razlici postavne temperature spremnika i temperature okoliša spremnika koje su poznate veličine na početku svakog vremenskog koraka. Pribrojnici u jednadžbama norme koji opisuju toplinske gubitke spremnika, a raspisani su pomoću definicijskog izraza za proračun toplinskih gubitaka zamijenjeni su oznakom toplinskih gubitaka spremnika $Q_{\text{sto};\text{ls};\text{vol},i}$, što doprinosi preglednosti i razumijevanju navedenih jednadžbi. Postavna temperatura korištena za računanje gubitaka je postavna temperatura pomoćnog grijača, što je realnije u odnosu na postavnu temperaturu solarnog sustava koja služi kao gornja temperaturna granica s sigurnosnog aspekta i gotovo nikad u spremniku nije postignuta.

U *koraku 1*, radi očuvanja energetske bilance, dodan je član toplinskih gubitaka u jednadžbe (39) i (40). U jednadžbama (39) i (41) zamijenjen je redoslijed oduzimanja temperature na početku vremenskog koraka i minimalne potrebne temperature kako bi predznak akumulirane dostupne energije bio usklađen s predznacima dovedene i odvedene topline iz spremnika.

U *koraku 3* zamijenjena je veličina $\vartheta_{W;\text{sto};\text{out}}$ veličinom $\vartheta_{\text{sto};\text{sol};\text{set}}$ jer je unos topline primarnog generatora topline, ovdje solarnog kolektora, ograničen postavnom temperaturom spremnika, a ne minimalnom temperaturom PTV-a. U *koraku 3* u jednadžbi (44) temperatura ϑ_{amb} zamijenjena je temperaturom $\vartheta_{\text{sto};H;\text{tmp3}}$ zbog toga što pomoćni grijač treba vodu temperature na kojoj se nalazi nakon odvođenja energije za grijanje i PTV zagrijati do postavne temperature, a ne do temperature okoliša. Iz jednadžbe (44) uklonjena je energija primarnog

grijača i toplinskih gubitaka spremnika jer su one već uračunate tijekom proračuna temperature $\vartheta_{sto;H;tmp3}$.

Prema normi, u *koraku 3*, pomoćnim se grijačem nadoknađuje neisporučena količina energije za PTV i grijanje te se ta energija predaje spremniku, ali se zatim neisporučena energija ne oduzima iz spremnika. Rezultat toga je zagrijavanje spremnika iznad postavne temperature pri čemu energija u trenutnom vremenskom koraku ostaje neisporučena što predstavlja veliki problem u proračunu, posebno kod grubljih vremenskih koraka kao što su mjesečni i godišnji. Iz tog razloga u sklopu *koraka 3* dodane su jednadžbe (47)-(50) koje opisuju odvođenje energije za PTV i grijanje dostupne nakon doprinosa pomoćnog grijača.

U čitavoj *metodi B* zamijećen je velik broj grešaka u indeksima veličina koje se koriste u proračunu. Postoji velik broj nelogičnosti u korištenim indeksima u obje metode norme koje je potrebno uskladiti ili objasniti.

3.2. HRN EN 15316-4-3:2017 [7]

3.2.1. Metoda 2

Metoda 2 norme HRN EN 15316-4-3:2017 bazirana je na *f-chart* metodi proračuna solarnih sustava [8]. Vremenski korak proračuna jedan je mjesec. Rezultati proračuna su doprinos solarnog sustava i pomoćnog grijača u proizvodnji potrebne energije za potrošnu toplu vodu i za grijanje prostora, toplinski gubici sustava, iznos iskoristivih energetske gubitaka te potrošnja pomoćne energije. Ova metoda ne zahtjeva korištenje posebne norme za proračun akumulacijskog spremnika.

Većina jednadžbi iz *metode 2* jednake su za proračun potrošne tople vode i za proračun grijanja prostora. Veličine u opisu tih jednadžbi imaju indeks x koji se može zamijeniti indeksom W kod dijela proračuna PTV-a ili indeksom H kod dijela proračuna grijanja.

Mjesečno prosječno sunčevo zračenje na ravlinu kolektora korigira se ovisno o orijentaciji kolektora:

$$I_{\text{sol};m} = I_{\text{sol};S45;m} \cdot f_{\text{col}} \quad (53)$$

Faktor koji označava udio dijela sustava koji se koristi za pripremu potrošne tople vode ili grijanja u ukupnom sustavu iznosi:

$$f_{x;\text{use};m} = \frac{Q_{x;\text{sol};\text{us};m}}{Q_{W;\text{sol};\text{us};m} + Q_{H;\text{sol};\text{us};m}} \quad (54)$$

Površina dijela solarnog kolektora koja se koristi za zagrijavanje PTV-a ili za grijanje iznosi:

$$A_{x;\text{sol};m} = f_{x;\text{use};m} \cdot A_{\text{sol};\text{mod}} \cdot N_{\text{col}} \quad (55)$$

Volumen akumulacijskog spremnika korišten za potrebe PTV-a ili grijanja iznosi:

$$V_{x;\text{sto};\text{tot}} = f_{x;\text{use};m} \cdot V_{\text{sto};\text{tot}} \quad (56)$$

Volumen dijela akumulacijskog spremnika koji se zagrijava pomoćnim grijačem za potrebe PTV-a ili grijanja iznosi:

$$V_{x;\text{sto};\text{bu}} = f_{x;\text{use};m} \cdot V_{\text{sto};\text{bu}} \quad (57)$$

Koeficijent gubitaka dijela akumulacijskog spremnika korištenog za potrebe PTV-a ili grijanja iznosi:

$$H_{x;\text{sto};\text{ls}} = f_{x;\text{use};m} \cdot H_{\text{sto};\text{ls};\text{tot}} \quad (58)$$

Referentne temperature korištene za proračun pripreme PTV-a i za grijanje iznose:

$$\vartheta_{W;\text{ref};m} = 11,6 + 1,18 \cdot \vartheta_{W;\text{srv}} + 3,86 \cdot \vartheta_{W;\text{cold};m} - 1,32 \cdot \vartheta_{e;m} \quad (59)$$

Referentna temperatura korištena za proračun grijanja iznosi:

$$\vartheta_{H;ref;m} = 0,75 \cdot \vartheta_{H;dis;rtm} + 55 \quad (60)$$

Dio volumena spremnika u kojem se u trenutnom vremenskom koraku akumulira toplina iz solarnog kolektora za potrebe grijanja ili PTV-a iznosi:

$$V_{X;sto,sol} = V_{X;sto,tot} \cdot (1 - f_{x;aux}) \quad (61)$$

gdje je faktor udjela volumena spremnika korištenog za primanje topline pomoćnog grijača:

$$f_{X;aux} = f_{bu} \cdot \frac{V_{x;sto;bu}}{V_{x;sto,tot}} \quad (62)$$

Faktor korekcije kapaciteta dijela spremnika korištenog za potrebe PTV-a ili grijanja iznosi:

$$f_{x;sto;m} = \left(\frac{75 \cdot A_{x;sol;m}}{V_{x;sto,sol}} \right)^{0,25} \quad (63)$$

Gubici dijela spremnika grijanog pomoćnim grijačem, a koji se koristi za potrebe PTV-a ili grijanja iznose:

$$Q_{x;bu;sto;ls;m} = H_{x;sto;ls} \cdot \frac{V_{x;sto,tot} - V_{x;sto,sol}}{V_{x;sto,tot}} \cdot (\vartheta_{x;bu;set} - \vartheta_{sto;amb}) \cdot t_{ci;m} \quad (64)$$

Korigirano toplinsko opterećenje solarnog sustava iznosi:

$$Q_{x;sol;ls;us} = Q_{x;sol;us;m} + Q_{x;bu;sto;ls;m} \quad (65)$$

Faktor X koji se koristi u f -chart metodi računa se prema:

$$X_{x;m} = \frac{A_{x;sol;m} \cdot H_{loop} \cdot \eta_{loop} \cdot (\vartheta_{x;ref;m} - \vartheta_{e;m}) \cdot f_{x;sto;m} \cdot t_{ci;m}}{Q_{sol;ls;us} \cdot 1000} \quad (66)$$

Faktor Y koji se koristi u f -chart metodi računa se prema:

$$Y_{x;m} = \frac{A_{x;sol;m} \cdot K_{hem}(50^\circ) \cdot \eta_o \cdot \eta_{loop} \cdot I_{sol;m} \cdot t_{ci;m}}{Q_{sol;ls;us} \cdot 1000} \quad (67)$$

Maksimalna dopuštena vrijednost faktora X iznosi osamnaest, a minimalne vrijednosti faktora X i Y iznose nula.

Prva procjena solarnog doprinosa računa se prema izrazu:

$$Q_{x;sol;tmp;m} = f_{app} \cdot (a \cdot Y_{x;m} + b \cdot X_{x;m} + c \cdot Y_{x;m}^2 + d \cdot X_{x;m}^2 + e \cdot Y_{x;m}^3 + f \cdot X_{x;m}^3) \cdot Q_{x;sol;ls;us} \quad (68)$$

uz faktore a - f -chart metode čije su vrijednosti preuzete iz norme [7].

Udio solarne energije u ukupnom toplinskom opterećenju iznosi:

$$f_{x,tmp;m} = \frac{Q_{x,sol,tmp;m}}{Q_{x,sol,ls;us}} \quad (69)$$

Toplinski gubici dijela spremnika grijanog solarnim sustavom, a koji se koristi za potrebe PTV-a ili grijanja iznose:

$$Q_{x,sol;sto;ls;m} = H_{x;sto;ls} \cdot \frac{V_{x;sto;sol}}{V_{x;sto;tot}} \cdot f_{x,tmp;m} \cdot t_{ci;m} \cdot (\vartheta_{x;low} + (\vartheta_{x;high} - \vartheta_{x;low}) \cdot f_{x,tmp;m} - \vartheta_{sto;amb;m}) \quad (70)$$

pri čemu vrijedi:

$$\begin{aligned} \vartheta_{W;low} &= \vartheta_{W;cold} \\ \vartheta_{W;high} &= \vartheta_{W;hw} \\ \vartheta_{H;low} &= \vartheta_{int} \\ \vartheta_{H;high} &= \vartheta_{H;dis;rtm} \end{aligned} \quad (71)$$

Solarni doprinos računa se prema izrazu:

$$Q_{x,sol;out;m} = Q_{x,sol,tmp;m} - Q_{x,sol;sto;ls;m} \quad (72)$$

pri čemu je minimalna moguća vrijednost $Q_{x,sol;out;m}$ jednaka nuli a maksimalna jednaka ukupnom korigiranom toplinskom opterećenju sustava $Q_{x,sol;ls;us}$.

Doprinos pomoćnoga grijača iznosi:

$$Q_{x;bu;out;m} = Q_{x,sol;us;m} - Q_{x,sol;out;m} + Q_{x;bu;sto;ls;m} \quad (73)$$

Isporučena energija solarnog sustava i dodatnog grijača iznosi:

$$Q_{x,sol;bu;out;m} = Q_{sol;us;m} \quad (74)$$

3.2.2. Metoda 3

Metoda 3 ograničena je na proračun solarnog toplovodnog kolektora, pripadajućih cjevovoda i regulacije solarnog kruga zbog čega je za proračun analiziranog sustava nužna kombinacija s normom HRN EN 15316-5:2017 za proračun akumulacijskog spremnika. Rezultat proračuna je toplina koja se predaje akumulacijskom spremniku, gubici solarnog kruga, iskoristivi gubici i potrošnja pomoćne energije. Vremenski korak proračuna je jedan sat. Metoda se može koristiti za dinamički proračun solarnog sustava.

Ukupna kolektorska površina iznosi:

$$A_{sol} = A_{sol;mod} \cdot N_{sol;mod} \quad (75)$$

Prva procjena prosječne temperature unutar kolektora iznosi:

$$\vartheta_{\text{col;avg};h} = \vartheta_{\text{sol;loop;in};h-1} + \frac{0.4 \cdot I_{\text{sol};h} \cdot A_{\text{sol}}}{\dot{m}_{\text{sol}} \cdot c_w \cdot 2} \quad (76)$$

gdje indeks $h - 1$ označava vrijednost u prethodnom vremenskom koraku.

Nastavak proračuna je iterativan iz razloga što učinkovitost kolektora $\eta_{\text{col};h}$ ovisi o prosječnoj temperaturi unutar kolektora $\vartheta_{\text{col;avg};h}$, a prosječna temperatura fluida unutar kolektora ovisi o učinkovitosti kolektora.

Učinkovitost solarnog kolektora računa se prema:

$$\eta_{\text{col};h} = \eta_0 \cdot K_{\text{hem}}(50^\circ) - a_1 \cdot T_h^* - a_2 \cdot T_h^{*2} \cdot I_{\text{sol};h} \quad (77)$$

Reducirana temperaturna razlika kolektora definirana je:

$$T_h^* = \frac{\vartheta_{\text{col;avg};h} - \vartheta_{e;h}}{I_{\text{sol};h}} \quad (78)$$

Energija koju solarni kolektor predaje cjevovodu solarnog kruga iznosi:

$$Q_{\text{sol;out};h} = \eta_{\text{col};h} \cdot \frac{I_{\text{sol};h}}{1000} \cdot A_{\text{sol}} \cdot t_{\text{ci}} \quad (79)$$

Toplinski gubici cjevovoda solarnog kruga iznose:

$$Q_{\text{sol;loop;ls};h} = \frac{H_{\text{sol;loop}}}{1000} \cdot (\vartheta_{\text{col;avg};h} - \vartheta_{\text{sol;amb};h}) \quad (80)$$

Toplina na izlazu iz kolektorskog kruga iznosi:

$$Q_{\text{sol;loop;out};h} = Q_{\text{sol;out};h} - Q_{\text{sol;loop;ls};h} \quad (81)$$

Minimalna vrijednost topline na izlazu iz solarnog kruga iznosi:

$$Q_{\text{sol;loop;out};h} > \frac{P_{\text{sol;pmp}} \cdot t_{\text{ci}} \cdot 3}{1000} \quad (82)$$

Ako je proračunata vrijednost manja, smatra se da je predana toplina $Q_{\text{sol;loop;out};h}$ jednaka nuli. $Q_{\text{sol;loop;out};h}$ podatak je koji se kao vrijednost $Q_{\text{sto;sol;in;req}}$ predaje u jednu od metoda proračuna spremnika prema normi HRN EN 15316-4-3:2017. Nakon izvršavanja proračuna unutar norme HRN EN 15316-4-3:2017A, iz nje se prosljeđuje podatak o temperaturi polaza kolektorskog kruga $\vartheta_{\text{sol;loop;in};h}$.

Prosječna temperatura vode unutar kolektora u sljedećoj iteraciji iznosi:

$$\vartheta_{\text{col;avg};h} = \frac{\vartheta_{\text{sol;loop;in};h-1} + \vartheta_{\text{sol;loop;in};h}}{2} + \frac{Q_{\text{sol;loop;out};h}}{\dot{m}_{\text{col}} \cdot c_w \cdot 2} \quad (83)$$

Zatim proračun ulazi u sljedeću iteraciju od jednadžbe (77) i ponavlja se sve dok rezultati u dvije sukcesivne iteracije nisu unutar zadane tolerancije konvergencije.

3.2.3. Komentar izmjena metoda 2 i 3

Kod *metode 2* norme HRN EN 15316-4-3:2017 nisu uočene značajne pogreške. Jedine izmjene koje su uvedene u odnosu na normu je dodavanje indeksa x kod nekih veličina koje se računaju i u dijelu proračuna PTV-a i u dijelu proračuna grijanja. U metodi 3 nije bilo potrebno raditi izmjene.

3.3. Proračun sustava korištenjem metode A i metode 3

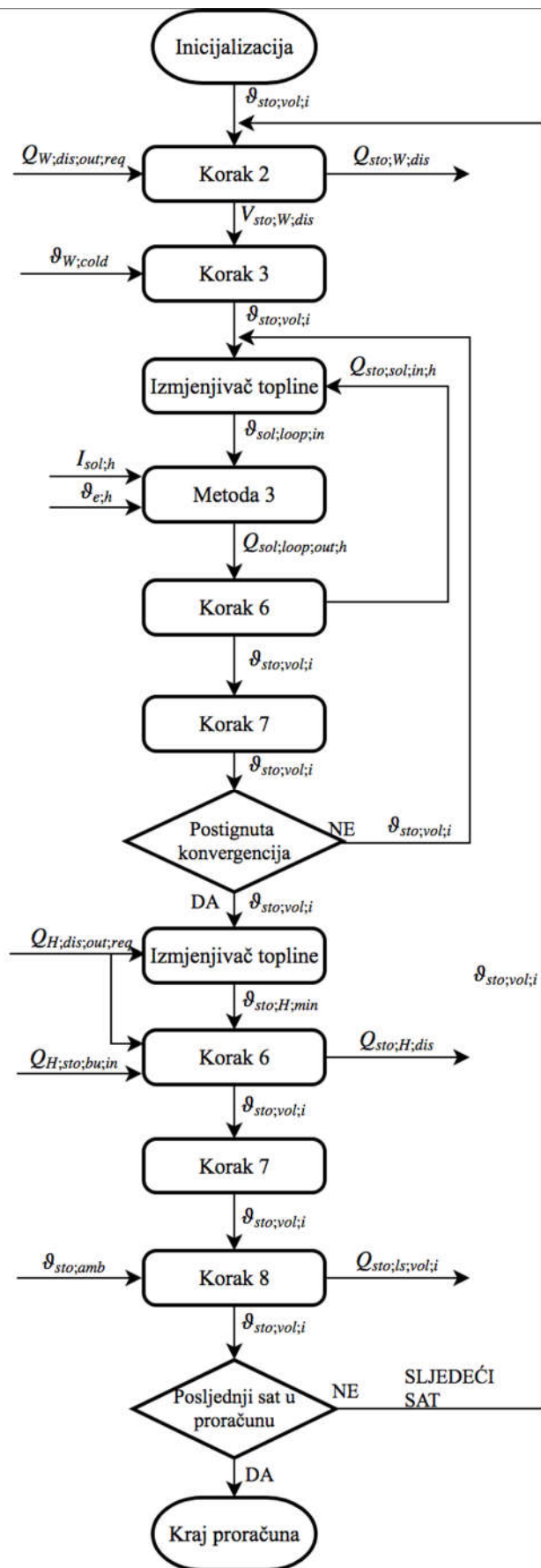
Proračun sustava opisanog u poglavlju 4 proveden je korištenjem kombinacije *metode A* norme HRN EN 15316-5:2017 i *metode 3* norme HRN EN 15316-4-3:2017. Vremenski korak proračuna iznosi jedan sat pri čemu je u obzir uzeta temperaturna stratifikacija vode unutar akumulacijskog spremnika. Koraci *metode A* norme HRN EN 15316-5:2017 te *metoda 3* norme HRN EN 15316-4-3:2017 moduli su proračuna koji mogu tijekom proračunske procedure biti korišteni više puta. Blok dijagram proračuna prikazan je na Slici 9.

Ulazni podaci u proračun, promjenjivi s vremenom, su satni meteorološki podaci $I_{sol,h}$ i $\vartheta_{e,h}$ te podaci o energiji potrebnoj za pripremu PTV-a $Q_{W;dis;out;req}$ i za grijanje zgrade $Q_{H;dis;out;req}$. Na početku proračuna provodi se inicijalizacija temperatura spremnika u početnom vremenskom trenutku. Zatim se provodi proračun sustava u svakom satu u godini.

Prvi korak u proračunu za pojedini sat u godini je *korak 2* kojim se na temelju ulaznih podataka temperature vode u svakom homogenom segmentu spremnika i $\vartheta_{sto,vol,i}$ te potrebne energije za pripremu PTV-a $Q_{W;dis;out;req}$ proračunava količina isporučene toplinske energije podsustavu distribucije PTV-a $Q_{sto,W,dis}$ i isporučeni volumen vode iz spremnika $V_{sto,use,W}$. Energija $Q_{sto,W,dis}$ izlazni je podatak proračuna, a volumen $V_{sto,use,W}$ prosljeđuje se u *korak 3* proračuna kojim se proračunava temperatura u spremniku nakon izvlačenja vode za PTV i nadopunjavanja istom količinom svježje vode temperature $\vartheta_{W,cold}$. Izlazni podatak *koraka 3* je temperatura svakog segmenta spremnika $\vartheta_{sto,vol,i}$ i njime završava proračun vezan uz potrošnu toplu vodu.

Zatim se provodi iterativni proračun solarnog podsustava. Proračunom izmjenjivača topline solarnog kruga prema temperaturi vode u spremniku $\vartheta_{sto,vol,i}$ i toplinskoj energiji koja se izmjenjivačem predaje u spremnik $Q_{sol;loop;out,h}$ dobiva se temperatura polaza kolektorskog kruga $\vartheta_{sol;loop;in,h}$. Proračun zahtijeva iteraciju jer energija $Q_{sol;loop;out,h}$ ovisi o temperaturi polaza $\vartheta_{sol;loop;in,h}$. Proračun također zahtijeva iteraciju jer se temperatura vode u kolektoru $\vartheta_{col;avg,h}$ prema jednadžbi (83) računa prema prosjeku temperature polaza prethodnog i trenutnog vremenskog koraka pri čemu $\vartheta_{sol;loop;in,h}$ ovisi o predanoj toplinskoj energiji $Q_{sol;loop;out,h}$, a predana energija ovisi o $\vartheta_{col;avg,h}$.

Modulom *metoda 3* proračunava se temeljem meteoroloških podataka i temperature polaza solarnog sustava energija koju solarni sustav predaje spremniku $Q_{sol;loop;out,h}$. Ta energija, uz trenutnu temperaturu vode u spremniku $\vartheta_{sto,vol,i}$, ulaz je u modul *metode 6* kojim se proračunava temperatura u spremniku $\vartheta_{sto,vol,i}$ nakon akumulacije energije iz solarnog sustava.



Slika 9. Blok dijagram proračuna korištenjem metode A i metode 3

Korakom 6 proračunava se i stvarno uskladištena toplinska energija solarnog sustava $Q_{sto;sol;in,h}$ u spremniku, ograničena postavnom temperaturom $\vartheta_{sto;sol;set}$. Energija $Q_{sto;sol;in,h}$ ulaz je u modul *Izmjenjivač topline* u sljedećoj iteraciji. Posljednji korak u proračunu vezanom uz solarni doprinos toplinske energije spremniku je postizanje stabilne temperaturne stratifikacije pomoću *koraka 7*. Temperatura $\vartheta_{sto;vol,i}$ nakon postizanja stabilne stratifikacije koristi se u sljedećoj iteraciji proračuna solarnog podsustava sve dok energija $Q_{sol;loop;out,h}$ ne zadovolji uvjet konvergencije.

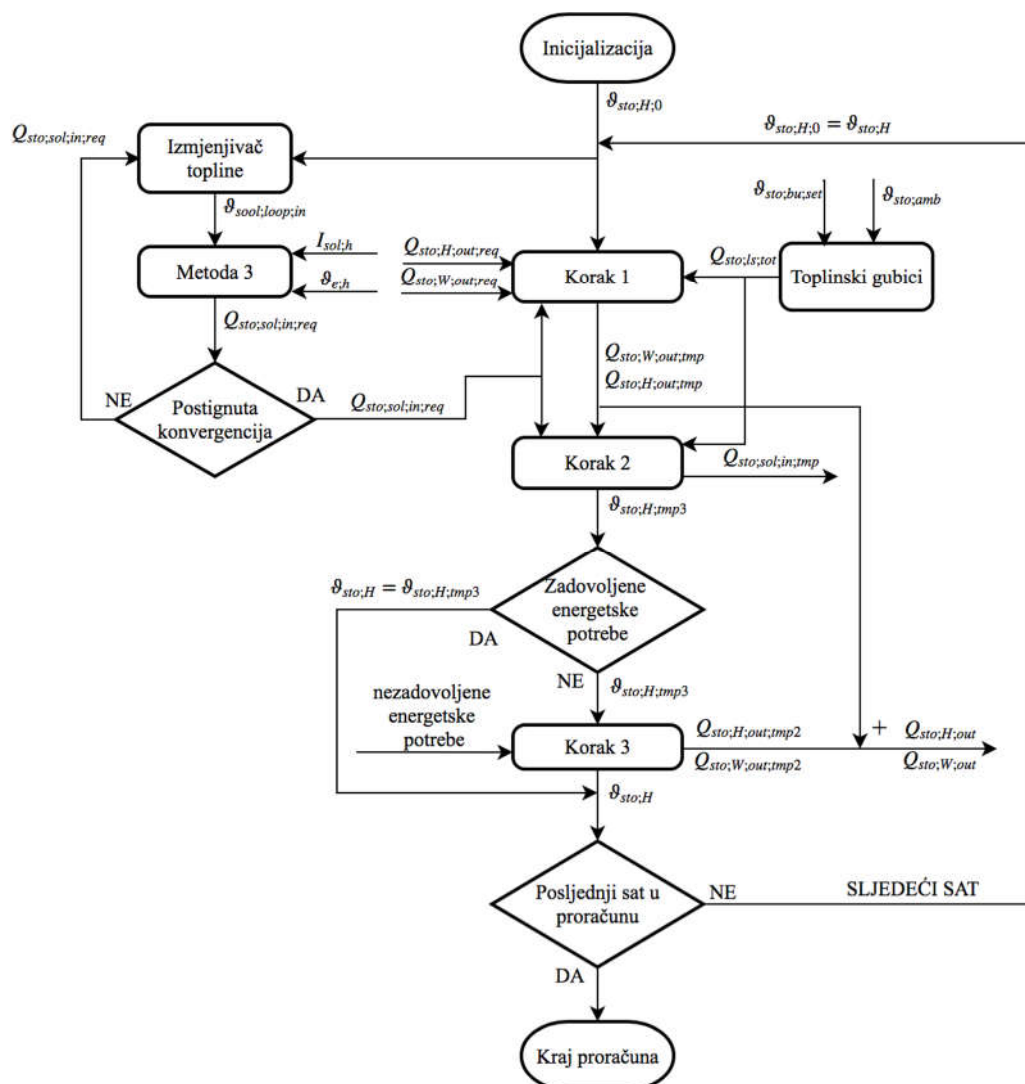
Zatim slijedi proračun vezan uz energiju potrebnu za grijanje i energetski doprinos pomoćnog grijača. Modulom *Izmjenjivač topline* prema potrebnoj energiji za grijanje $Q_{H;dis;out;req}$ proračunava se minimalna temperatura segmenta u kojem se nalazi izmjenjivač topline kruga grijanja potrebna za zadovoljenje potreba podsustava grijanja $\vartheta_{sto,H,min}$. Korištenjem modula *koraka 6* s ulaznim podacima potrebne energije za grijanje $Q_{H;dis;out;req}$, energije pomoćnog grijača $Q_{H;sto,bu,in}$ i trenutne temperature spremnika $\vartheta_{sto;vol,i}$ računa se isporučena energija podsustavu grijanja $Q_{sto,H,dis}$ i temperatura u spremniku nakon akumulacije energije pomoćnog grijača i odvođenja energije za grijanje $\vartheta_{sto;vol,i}$.

Toplinska energija pomoćnog grijača predaje se spremniku u slučaju kad potrebe sustava grijanja nisu zadovoljene ili je temperatura dijela spremnika grijanog pomoćnim grijačem ispod regulacijskog temperaturnog raspona, inače je ona jednaka nuli. Iznos predane toplinske energije pomoćnog grijača $Q_{H;sto,bu,in}$ određen je količinom neisporučene energije podsustavu grijanja i količinom energije potrebne za zagrijavanje dijela spremnika grijanog pomoćnim grijačem do gornje granice temperaturnog raspona regulacije, uz ograničenje maksimalne snage pomoćnoga grijača $\Phi_{sto,bu}$.

Nakon proračuna vezanog uz toplinsku energiju potrebnu za grijanje i energiju pomoćnog grijača korištenjem modula *koraka 7* osigurava se stabilna temperaturna stratifikacija vode u spremniku. Posljednji korak u proračuna je proračunavanje toplinskih gubitaka spremnika. Temeljem ulaznih podataka trenutne temperature u spremniku prije toplinskih gubitaka $\vartheta_{sto;vol,i}$ i temperature okoliša spremnika $\vartheta_{sto;amb}$, dobiva se iznos toplinskih gubitaka spremnika $Q_{sto;ls;vol,i}$ i konačna temperatura u trenutnom vremenskom koraku $\vartheta_{sto;vol,i}$ čime završava proračun za trenutni vremenski korak. Rezultati proračuna za trenutni sat spremaju se nakon čega se prelazi na proračun sljedećeg vremenskog koraka, počevši od modula *koraka 2* ili se, u slučaju da se radi o posljednjem vremenskom koraku, proračun završava.

3.4. Proračun sustava korištenjem metode B i metode 3

Metoda B norme HRN EN 15316-5:2017 u kombinaciji s *metodom 3* norme HRN EN 15316-4-3:2017 korištena je za pojednostavljeni satni proračun solarnog sustava pri čemu je korištena pretpostavka homogene temperature unutar akumulacijskog spremnika. Blok dijagram proračuna prikazan je na Slici 10.



Slika 10. Blok dijagram proračuna korištenjem metode A i metode 3

Energija primarnog generatora topline $Q_{X,\text{sto},\text{in}}$ u ovom je slučaju energija koji solarni krug može predati spremniku $Q_{\text{sto};\text{sol};\text{in};\text{req}}$. Iterativni proračun solarnog sustava provodi se na početku proračuna za svaki vremenski korak. Temperatura polaza solarnog kruga $\vartheta_{\text{sol};\text{loop};\text{in};\text{h}}$ proračunava se pomoću modula *Izmjenjivač topline* čiji su ulazni podaci temperatura na kraju prošlog vremenskog koraka $\vartheta_{\text{sto},\text{H},0}$ i toplinska energija koju kolektor može predati spremniku $Q_{\text{sto};\text{sol};\text{in};\text{req}}$, a koja ovisi o temperaturi polaza solarnog kruga, zbog čega je proračun iterativan.

Temperatura $\vartheta_{\text{sol;loop;in;h}}$ uz meteorološke podatke ulazni su podaci modula *metode 3* norme HRN EN 15316-4-3:2017 kojim se proračunava toplinska energija koju kolektor može predati spremniku $Q_{\text{sto;sol;in;req}}$.

Nakon proračuna vezanog uz solarni kolektor, provodi se proračun toplinskih gubitaka spremnika pozivanjem modula *Toplinski gubici*. Izlazni podatak modula toplinski su gubici spremnika u trenutnom vremenskom koraku $Q_{\text{sto;ls;tot}}$, proračunati temeljem postavne temperature pomoćnog grijača $\vartheta_{\text{sto;bu;set}}$ i temperature okoliša spremnika $\vartheta_{\text{sto;amb}}$.

Sljedeći korak proračuna provjera je količine toplinske energije za pripremu PTV-a i za grijanje koju spremnik može predati bez korištenja pomoćnog grijača pomoću modula *Korak 1*. Ulazni podaci u modul su potrebna energija za pripremu PTV-a $Q_{\text{W;sto;out;req}}$ i za grijanje $Q_{\text{H;sto;out;req}}$ te toplinski gubici spremnika $Q_{\text{sto;ls;tot}}$ i toplinska energija koju kolektor predaje spremniku $Q_{\text{sto;sol;in;req}}$. Izlazni podaci su dostupna energija za PTV $Q_{\text{W;sto;out;tmp}}$ i za grijanje $Q_{\text{H;sto;out;tmp}}$ bez doprinosa pomoćnog grijača.

Zatim se poziva modul *Korak 2* čiji su ulazni podaci toplinske energije $Q_{\text{W;sto;out;tmp}}$, $Q_{\text{H;sto;out;tmp}}$, $Q_{\text{sol;sto;in}}$ i $Q_{\text{sto;ls;tot}}$ i koji proračunava energetske bilancu spremnika bez doprinosa pomoćnog grijača. Ovim modulom zbog postavne temperature $\vartheta_{\text{sto;sol;set}}$ ograničena je toplinska energija koju kolektor može predati spremniku $Q_{\text{sto;sol;in;tmp}}$. Izlazni podatak modula je toplinska energija solarnog sustava predana spremniku $Q_{\text{sto;sol;in;tmp}}$ i temperatura $\vartheta_{\text{sto;H;tmp3}}$ koja je konačna temperatura spremnika u slučaju da su potrebe za energijom za podsustava PTV-a i grijanja zadovoljene.

Ako potrebe za energijom nisu zadovoljene, poziva se modul *Korak 3* gdje su ulazni podaci nezadovoljene potrebe za energijom PTV-a $Q_{\text{W;sto;out;req}} - Q_{\text{W;sto;out;tmp}}$ i grijanja $Q_{\text{H;sto;out;req}} - Q_{\text{H;sto;out;tmp}}$ te temperatura $\vartheta_{\text{sto;H;tmp3}}$. Rezultati proračuna modula *korak 3* su konačna temperatura nakon svih energetskih izmjena u trenutnom vremenskom koraku $\vartheta_{\text{sto;H}}$, ukupna predana energija za potrebe PTV-a $Q_{\text{W;sto;out}}$, za potrebe grijanja $Q_{\text{H;sto;out}}$ i energija pomoćnog grijača $Q_{\text{H;sto;bu;in}}$ koja je ograničena maksimalnom snagom pomoćnog grijača $\Phi_{\text{sto;bu}}$. Spremanjem rezultata za trenutni vremenski korak proračun za taj korak završava i započinje proračun za sljedeći vremenski korak ili završava proračun u slučaju da je trenutni vremenski korak posljednji.

3.5. Proračun sustava korištenjem metode 2

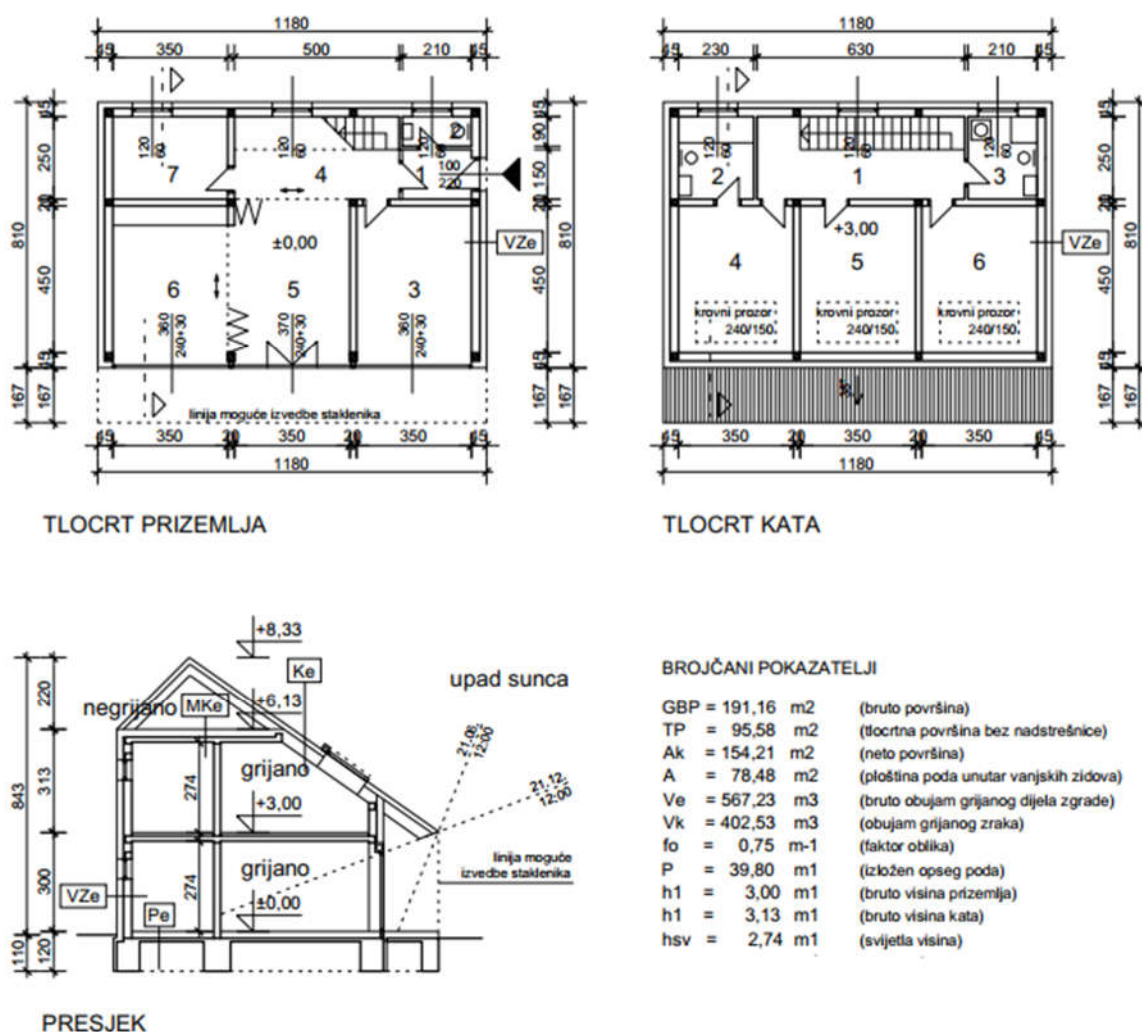
Metoda 2 norme HRN EN 15316-4-3:2017 omogućuje proračun solarnog sustava bez korištenja norme HRN EN 15316-5:2017. Vremenski korak proračuna je jedan mjesec, a ulazni podaci su prosječne mjesečne temperature zraka $\vartheta_{e,m}$, mjesečno prosječno sunčevo zračenje na ravninu kolektora $I_{sol,m}$, mjesečne potrebe energije za pripremu PTV-a $Q_{W;sol;us;m}$ i za grijanje $Q_{H;sol;us;m}$. Rezultati proračuna su doprinos solarnog sustava $Q_{x;sol;out;m}$ i pomoćnog grijača $Q_{x;bu;out;m}$ u proizvodnji potrebne energije za potrošnu toplu vodu i za grijanje i toplinski gubici dijela spremnika grijanog solarnim sustavom $Q_{x;sol;sto;ls;m}$ te dijela grijanog pomoćnim grijačem $Q_{x;bu;sto;ls;m}$. Proračun se provodi na način opisan u poglavlju 3.2.1.

4. OPIS OBJEKTA I ANALIZIRANOG SUSTAVA S ULAZNIM PODACIMA PRORAČUNA

Proračun opisan u radu provodi se na jednostambenoj obiteljskoj kući. Termotehnički sustav u kući sastoji se od podsustava predaje, podsustava razvoda te podsustava proizvodnje toplinske energije koji uključuje akumulacijski spremnik. U radu je fokus postavljen na dinamičko simuliranje rada podsustava proizvodnje toplinske energije čiji su glavni dijelovi solarni kolektori, akumulacijski spremnik tople vode, pomoćni grijač i regulacija. Energija za grijanje i pripremu potrošne vode koju podsustav proizvodnje treba isporučiti podsustavu razvoda te meteorološki podaci koriste se u proračunu kao rubni uvjeti. U ovom poglavlju dani su parametri proračuna za referentne uvjete za koje su uspoređeni različiti proračuni opisani u poglavljima 2 i 3. U poglavlju 6, neki od tih parametara varirani su kako bi se ispitao njihov utjecaj na proračunatu potrošnju energije i udio obnovljive energije u podsustavu proizvodnje.

4.1. Opis objekta

Objekt za koji se provodi simulacija referentna je stambena kuća na području grada Zagreba prikazana na Slici 11. Simulacija se provodi za dvije razine godišnje potrebne toplinske energije za grijanje od 20 i 70 kWh/m² pri čemu su karakteristike ovojnice zgrade modificirane kako bi godišnje energetske potrebe grijanja bile u skladu s navedenim zahtjevima. Karakteristike kuće za obje razine potrebe energije za grijanje dane su u Tablici 1.



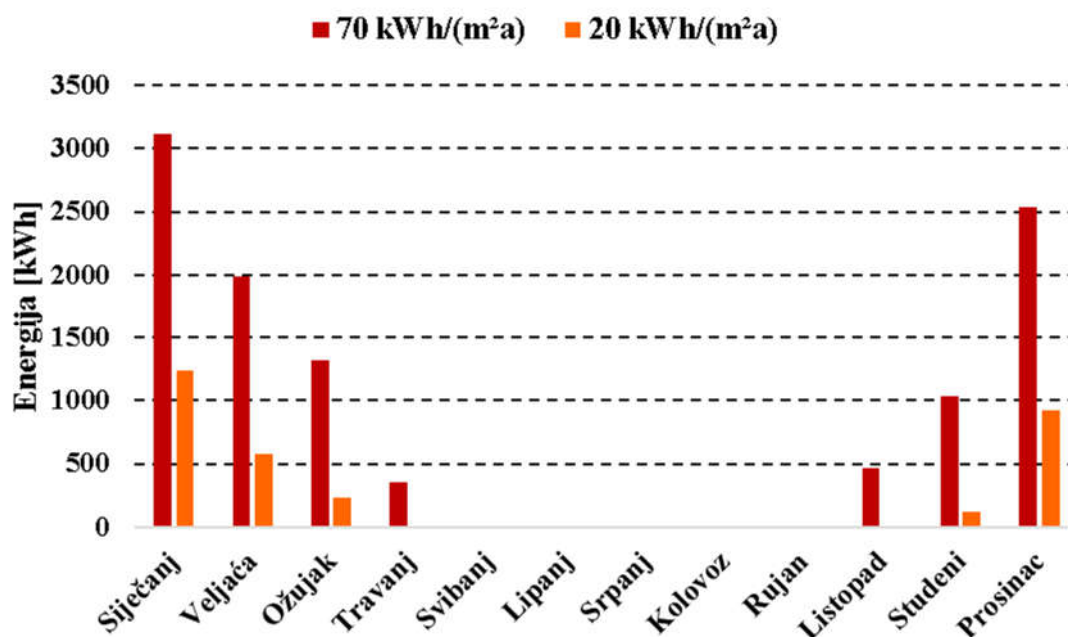
Slika 11. Analizirani objekt s osnovnim dimenzijama

Tablica 1. Karakteristike analiziranog objekta za dvije razine energetske potreba

Karakteristika zgrade	70 kWh/m ²	20 kWh/m ²
Temperatura u grijanom prostoru [°C]	20	
Broj stanara [-]	5	
Neto obujam grijanog zraka [m ³]	402.53	
Broj izmjena zraka pri razlici tlaka od 50 Pa [-]	4	1
Korisna površina zgrade [m ²]	154,21	
Površina vanjskih zidova [m ²]	158,02	
U vrijednost vanjskog zida [W/(m ² K)]	0.40	0,14
Površina serklaža vanjskog zida [m ²]	30,38	
U vrijednost serklaža vanjskog zida [W/(m ² K)]	0,41	0,13
Površina kosog krova [m ²]	33,54	
U vrijednost kosog krova [W/(m ² K)]	0,31	0,12
Površina stropa prema negrijanom tavanu [m ²]	59,89	
U vrijednost stropa [W/(m ² K)]	0,34	0,13
Površina poda [m ²]	78,48	
U vrijednost poda [W/(m ² K)]	0,67	0,30
Neto površina prozora [m ²]	41.20	
U vrijednost prozora [W/(m ² K)]	1,10	0,70

4.2. Energetske potrebe

Satna raspodjela potrebne toplinske energije za grijanje prostora, $Q_{H,nd}$ po karakterističnim danima u godini proračunata je računalnim programom *MGIPU Energetski Certifikator*. Mjesečna raspodjela $Q_{H,nd}$ za godišnje potrebe toplinske energije za grijanje od 70 i 20 kWh/m² dana je na Slici 12. Kako bi se u obzir uzeli neiskorišteni toplinski gubici podsustava razvoda i predaje energije, toplinska energija za grijanje prostora na izlazu iz podsustava proizvodnje, odnosno iz akumulacijskog spremnika $Q_{H,sto;out;req}$ dobivena je povećanjem potrebne energije $Q_{H,nd}$ za 10%.

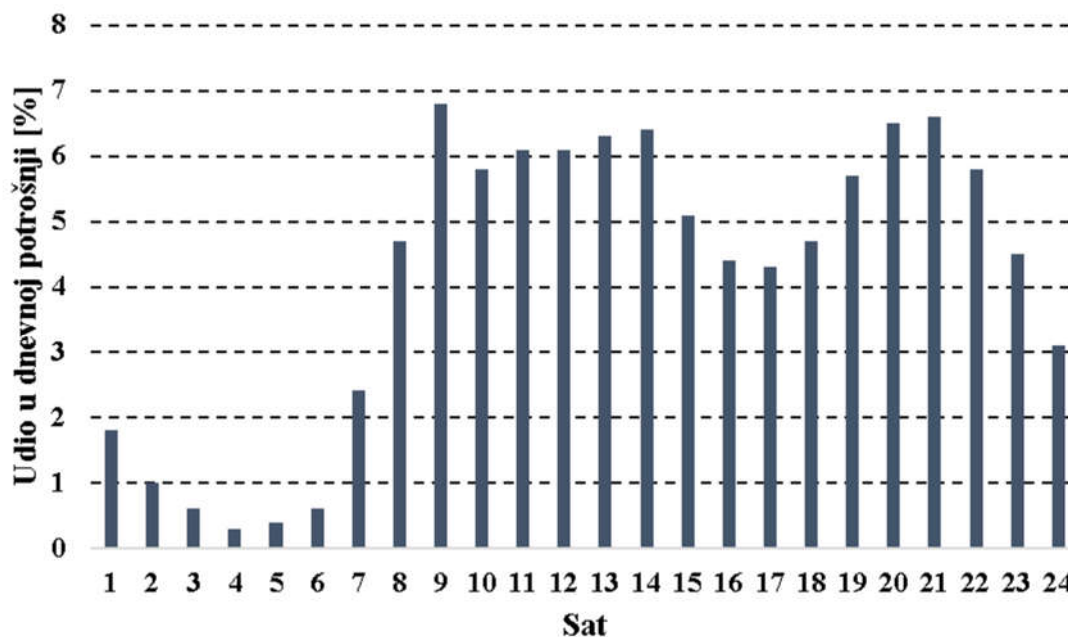


Slika 12. Mjesečni $Q_{H,nd}$ za dvije razine potrebne godišnje energije za grijanje

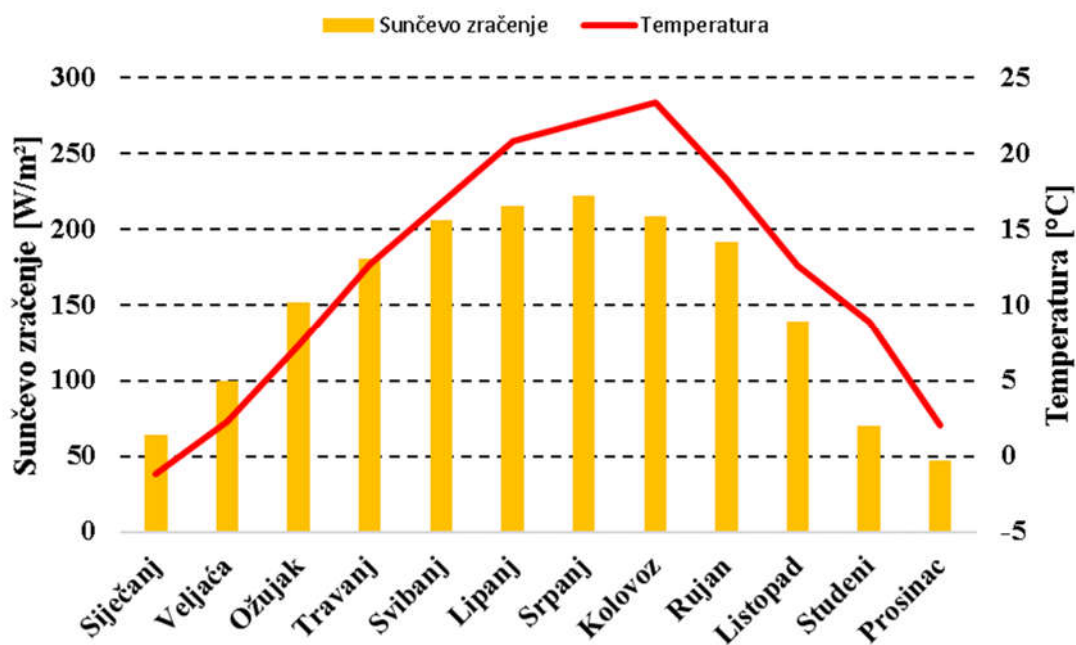
Godišnja potrebna toplinska energija potrošne tople vode iznosi 16 kWh/m² i proračunava se u odnosu na temperaturu svježije vode $\vartheta_{W,cold}$. Potrošnja potrošne tople vode raspodijeljena je jednako u svakom danu u godini. Na Slici 13 prikazan je dnevni profil potrošnje tople vode korišten u referentnim simulacijama. Profil je preuzet iz norme FprEN 12831-3:2016 [9] i odnosi se na jednoobiteljske zgrade. Toplinska energija za pripremu PTV-a također je povećana za 10% za izračun potrebne toplinske energije koja se iz podsustava spremnika treba predati razvodu PTV-a $Q_{W,sto;out;req}$.

Satni meteorološki podaci o temperaturama zraka i sunčevom zračenju za svaki karakterističan dan u godini za postaju Zagreb Maksimir također su preuzeti iz računalnog programa *MGIPU Energetski Certifikator*. Prema orijentaciji solarnog kolektora, korišteni su podaci o sunčevom

zračenju na nagnutu plohu okrenutu prema jugu s kutom nagiba od 45°. Na Slici 14 dane su prosječne mjesečne vrijednosti temperature zraka i sunčevog zračenja.



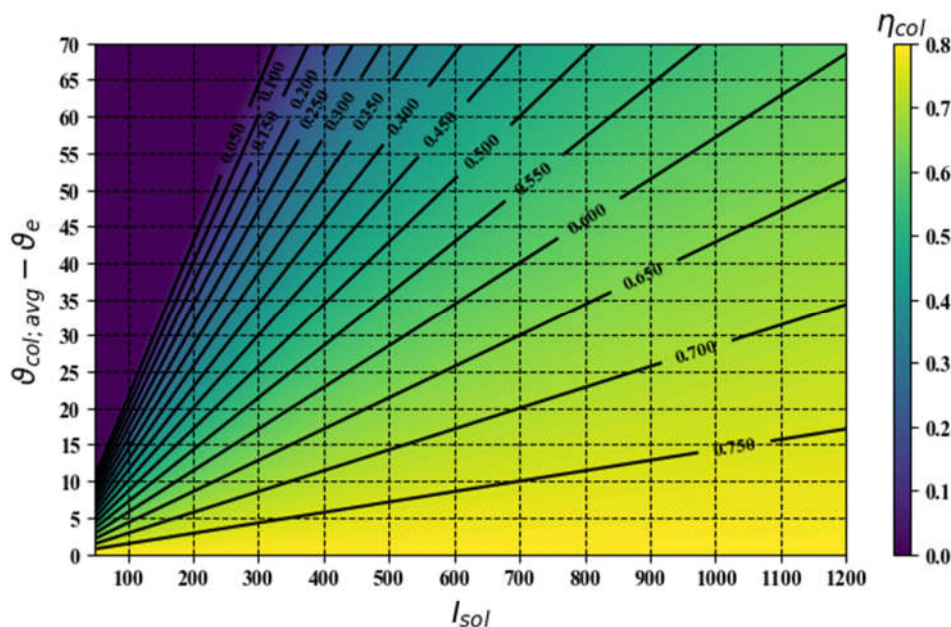
Slika 13. Dnevni profil potrošnje PTV



Slika 14. Mjesečni prosjeci temperature zraka i intenziteta sunčevog zračenja

4.3. Solarni kolektor

Za pretvorbu sunčevog zračenja u toplinsku energiju koristi se ostakljeni pločasti solarni kolektor postavljen na krov objekta i orijentiran prema jugu pod kutom od 45° , korisne površine A_{sol} i konstantnog masenog protoka fluida kroz kolektor svedenog na korisnu površinu \dot{m}_{col} . Učinkovitost kolektora proračunava se u simulaciji u ovisnosti o vršnoj učinkovitosti η_0 te koeficijentima a_1 i a_2 prema jednadžbi (7). Referentne vrijednosti koeficijenata za proračun učinkovitosti kolektora za ostakljeni pločasti kolektor uzete su iz norme HRN EN 15316-4-3:2017 i dane su u Tablici 2. Na Slici 15 prikazano je polje učinkovitosti kolektora u ovisnosti o intenzitetu sunčevog zračenja I_{sol} i o razlici srednje temperature fluida u kolektoru i temperature okoliša $\vartheta_{col;avg} - \vartheta_e$.



Slika 15. Ovisnost učinkovitosti kolektora o $\vartheta_{col;avg} - \vartheta_e$ i I_{sol}

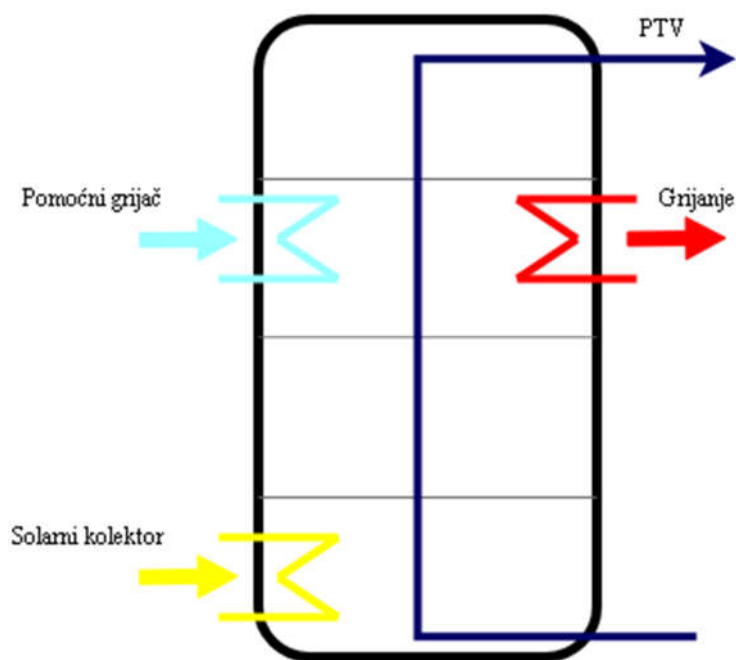
Cjevovod solarnog kruga smješten je unutar grijanog dijela kuće pa je temperatura okoliša cjevovoda jednaka temperaturi grijanog prostora, dok je koeficijent toplinskih gubitaka cjevovoda kolektora uzet prema normi HRN EN 15316-4-3:2017. Konstantan maseni protok fluida u solarnom krugu \dot{m}_{sol} postiže se pumpom solarnog kruga snage $P_{sol;pmp}$ upravljanom dvopoložajnom regulacijom opisanom u odlomku 2.3.1. Vrijednosti razlike temperature fluida na izlazu iz kolektora i u spremniku pri kojima se pumpa pali i gasi dane su u Tablici 2. Pumpa se iz sigurnosnih razloga gasi kad temperatura vode u spremniku dostigne temperaturu $\vartheta_{sto;sol;set}$. U Tablici 2 dane su vrijednosti svih korištenih parametara solarnog podsustava pri referentnim uvjetima simulacije.

Tablica 2. Parametri solarnog podsustava

Parametar	Oznaka	Vrijednost
Površina solarnog kolektora	$A_{\text{sol;mod}} [\text{m}^2]$	4
Broj solarnih kolektora	$N_{\text{sol}} [-]$	4
Maseni protok fluida kroz kolektor	$\dot{m}_{\text{col}} [\text{kg}/(\text{s m}^2)]$	0,02
Vršna učinkovitost kolektora	$\eta_0 [-]$	0.8
Koeficijent gubitaka kolektora prvog reda	$a_1 [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$	3,5
Koeficijent gubitaka kolektora drugog reda	$a_2 [\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^2)]$	0
Faktor promjene kuta upadnog zračenja	$K_{\text{hem}}(50^\circ) [-]$	0,94
Korekcijski faktor uslijed orijentacije kolektora	$f_{\text{col}} [-]$	1
Snaga pumpe solarnog kruga	$P_{\text{sol;pmp}} [\text{W}]$	33
Koeficijent izmjenjivača topline solarnog kruga	$H_{\text{sol;exh}} [\text{W/K}]$	200
Učinkovitost kolektorskog kruga s obzirom na izmjenjivač topline	$\eta_{\text{loop}} [-]$	0,944
Postavna temperatura dijela spremnika grijanog solarnim kolektorom	$\vartheta_{\text{sto;sol;set}} [^\circ\text{C}]$	90
Temperaturna razlika pri kojoj se gasi pumpa solarnog kruga	$\Delta\vartheta_{\text{sol;pmp;off}} [^\circ\text{C}]$	1
Temperaturna razlika pri kojoj se pali pumpa solarnog kruga	$\Delta\vartheta_{\text{sol;pmp;on}} [^\circ\text{C}]$	10
Koeficijent toplinskih gubitaka cjevovoda	$H_{\text{sol;loop}} [\text{W/K}]$	4
Temperatura okoline cjevovoda solarnog kruga	$\vartheta_{\text{sol;amb}} [^\circ\text{C}]$	20
Korekcijski faktor <i>f-chart</i> metode	$f_{\text{app}} [-]$	1,08
Faktor <i>f-chart</i> metode	$a [-]$	1,029
Faktor <i>f-chart</i> metode	$b [-]$	-0,147
Faktor <i>f-chart</i> metode	$c [-]$	-0,263
Faktor <i>f-chart</i> metode	$d [-]$	0,008
Faktor <i>f-chart</i> metode	$e [-]$	0,029
Faktor <i>f-chart</i> metode	$f [-]$	0,025

4.4. Podsustav spremnika i pomoćnog grijača

Solarni krug povezan je izmjenjivačem topline koeficijenta $H_{\text{sol;exh}}$ na toplovodni akumulacijski spremnik volumena $V_{\text{sto;tot}}$ i visine h_{sto} . Spremnik je za potrebe proračuna podijeljen na četiri segmenata jednakih volumena pri čemu je izmjenjivač topline solarnog kruga smješten unutar segmenta pri dnu spremnika, a izmjenjivači topline kruga grijanja i pomoćnog grijača smješteni su u drugom segmentu gledanom od vrha spremnika. Shema spremnika prikazana je na Slici 16.



Slika 16. Shematski prikaz akumulacijskog spremnika

Potreban maseni protok potrošne tople vode minimalne temperature $\vartheta_{W,\text{out,min}}$ odvodi se s vrha spremnika u podsustav razvoda PTV-a, a odvedena voda nadoknađuje se svježom temperature $\vartheta_{W,\text{cold}}$ pri dnu spremnika. Krug niskotemperaturnog grijanja posredno je spojen sa spremnikom pomoću izmjenjivača topline koeficijenta $H_{\text{sto;H;exh}}$ pri čemu minimalna temperatura polaza sustava grijanja iznosi $\vartheta_{H,\text{out,min}}$.

Gornji dio spremnika dodatno je grijan pomoćnim toplovodnim plinskim kotlom snage $\Phi_{\text{sto;bu}}$. Kotao je reguliran dvopoložajnom regulacijom i pali se kad temperatura u gornjem dijelu spremnika padne ispod postavne temperature $\vartheta_{\text{sto;bu;set}}$ za iznos $\Delta\vartheta_{\text{sto;bu;set;low}}$, a gasi se kad temperatura naraste iznad postavne u iznosu $\Delta\vartheta_{\text{sto;bu;set;high}}$. Kad je kotao uključen, radi punim kapacitetom $\Phi_{\text{sto;bu}}$. U Tablici 3 dani su svi parametri podsustava spremnika i pomoćnog grijača za referentni proračun.

Tablica 3. Parametri spremnika i pomoćnog grijača

Parametar	Oznaka	Vrijednost
Ukupni volumen spremnika	$V_{sto,tot}$ [l]	300
Visina spremnika	h_{sto} [m]	1.5
Broj segmenata na koji je podijeljen spremnik	N_{vol} [-]	4
Segment u kojem je smješten izmjenjivač topline solarnog kruga	N_{sol} [-]	1
Segment u kojem je smješten izmjenjivač topline pomoćnog grijača	N_{bu} [-]	3
Snaga pomoćnog grijača	$\Phi_{sto,bu}$ [kW]	8
Postavna temperatura dijela spremnika grijanog pomoćnim grijačem	$\vartheta_{sto,bu;set}$ [°C]	50
Razlika između temperature na kojoj se pomoćni grijač gasi i postavne temperature	$\Delta\vartheta_{sto,bu;set;high}$ [°C]	5
Razlika između postavne temperature i temperature na kojoj se pomoćni grijač pali	$\Delta\vartheta_{sto,bu;set;low}$ [°C]	5
Faktor regulacije pomoćnog grijača	f_{bu}	1
Minimalna temperatura polaza PTV-a	$\vartheta_{W,out,min}$ [°C]	40
Temperatura svježe vode	$\vartheta_{W,cold}$ [°C]	10
Segment u kojem je izmjenjivač topline grijanja	N_H [-]	3
Temperatura polaza podsustava grijanja	$\vartheta_{H,out,min}$ [°C]	40
Temperatura povrata kruga grijanja	$\vartheta_{H;dis;rtn}$ [°C]	30
Koeficijent izmjenjivača topline kruga grijanja	$H_{sto;H;exh}$ [W/K]	1500
Koeficijent toplinskih gubitaka spremnika	$H_{sto;ls}$ [W/K]	2,77
Temperatura okoliša spremnika	$\vartheta_{sto;amb}$ [°C]	16
Faktor gubitaka cjevovoda podsustava spremnika	$f_{sto;dis;ls}$ [-]	1
Faktor prilagodbe toplinskih gubitaka za mjesečni ili godišnji vremenski korak	$f_{sto,bac,acc}$ [-]	1

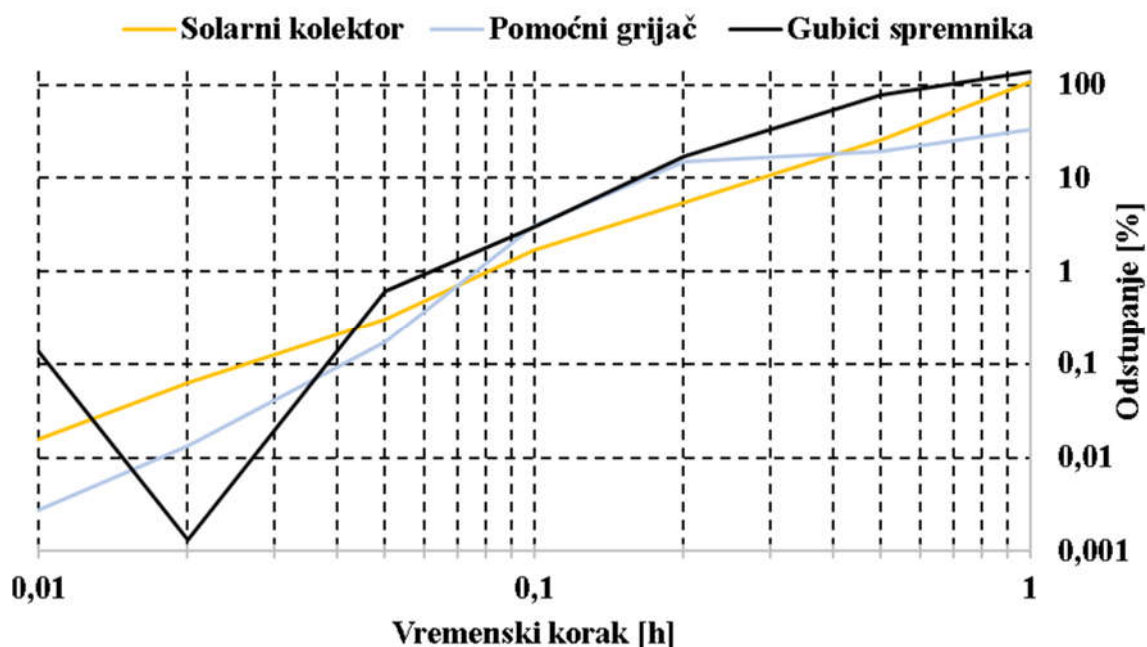
5. REZULTATI

U nastavku su prikazani i komentirani rezultati simulacije sustava opisanog u poglavlju 4 dinamičkim modelom opisanim u poglavlju 2 pri referentnim uvjetima proračuna. Zatim su prikazani rezultati prema tri opisane metode proračuna u poglavlju 3 te je dana njihova usporedba u odnosu na rezultate dobivene dinamičkim modelom.

5.1. Dinamički model

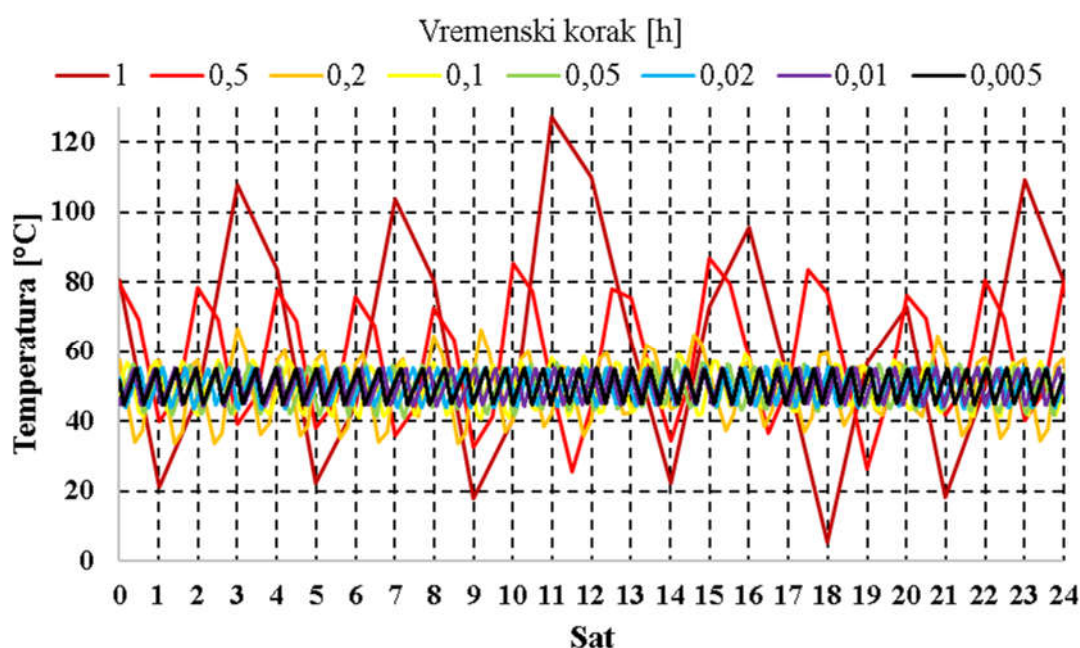
5.1.1. Vremenski korak proračuna

Kako bi se odabrao optimalan vremenski korak simulacije, proveden je niz simulacija s vremenskim korakom od 0.005 h do 1 h. Vrijednosti dobivene simulacijom s najmanjim korakom od 0.005 h uzete su kao referentne u odnosu na koje su uspoređene vrijednosti s grubljim vremenskim koracima. Na Slici 17 prikazan je dijagram relativnih odstupanja akumulirane toplinske energije solarnog kolektora i pomoćnog grijača te toplinskih gubitaka spremnika u ovisnosti o korištenom vremenskom koraku simulacije u odnosu na vrijednosti kod koraka 0,005 h.



Slika 17. Odstupanja energetskih rezultata proračuna u ovisnosti o vremenskom koraku

Povećanjem vremenskih koraka dolazi do probijanja temperature segmenta spremnika u kojem je smješten izmjenjivač topline pomoćnog grijača iznad i ispod regulacijskog raspona pomoćnog grijača što uzrokuje značajna odstupanja rezultata. Uzrok proboja temperature izvan regulacijskog raspona prevelik je unos toplinske energije u posljednjem koraku prije postizanja gornje regulacijske granice pomoćnog grijača i preveliko odvođenje u koraku prije postizanje donje temperaturne granice. Taj efekt prikazan je na Slici 18 za karakterističan dan u mjesecu siječnju. Kao kompromisno rješenje između točnosti proračuna i zahtjeva na vremenske i računalne resurse odabran je vremenski korak od 0.02 h.



Slika 18. Temperaturni profil segmenta spremnika grijanog pomoćnim grijačem za različite vremenske korake proračuna

5.1.2. Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje 70 kWh/m²

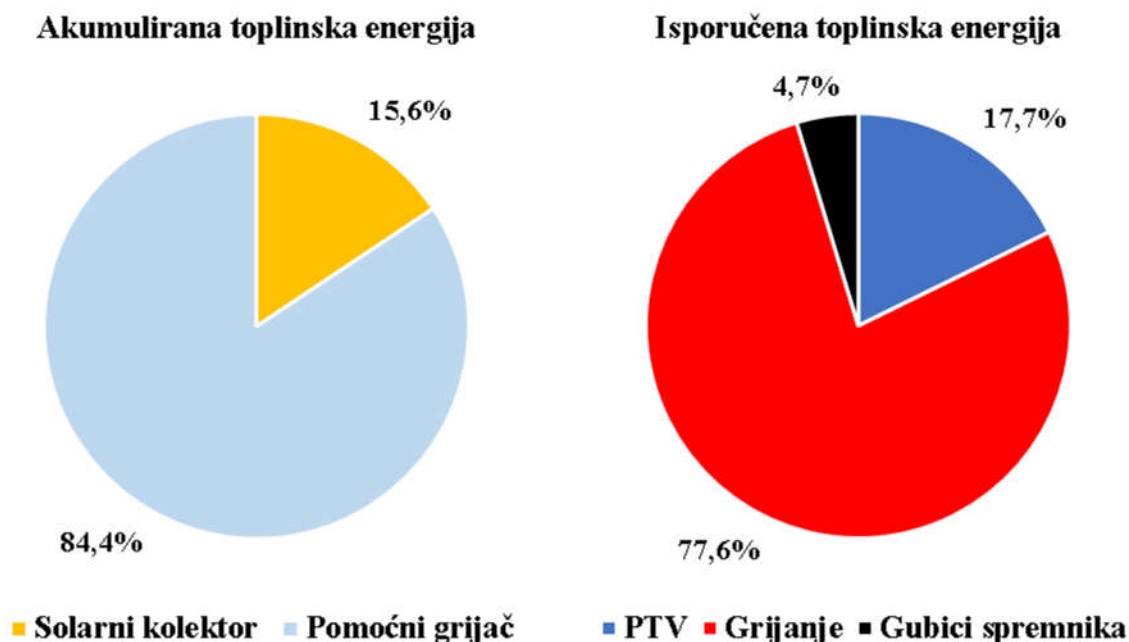
U Tablici 4 dani su godišnji i mjesečni rezultati proračuna pri referentnim parametrima simulacije za zgradu s godišnjom potrebnom toplinskom energijom za grijanje od 70 kWh/m². Na Slikama 19 i 20 prikazani su mjesečni i godišnji rezultati akumulirane i isporučene toplinske energije akumulacijskog spremnika.

Tablica 4. Rezultati dinamičke simulacije za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

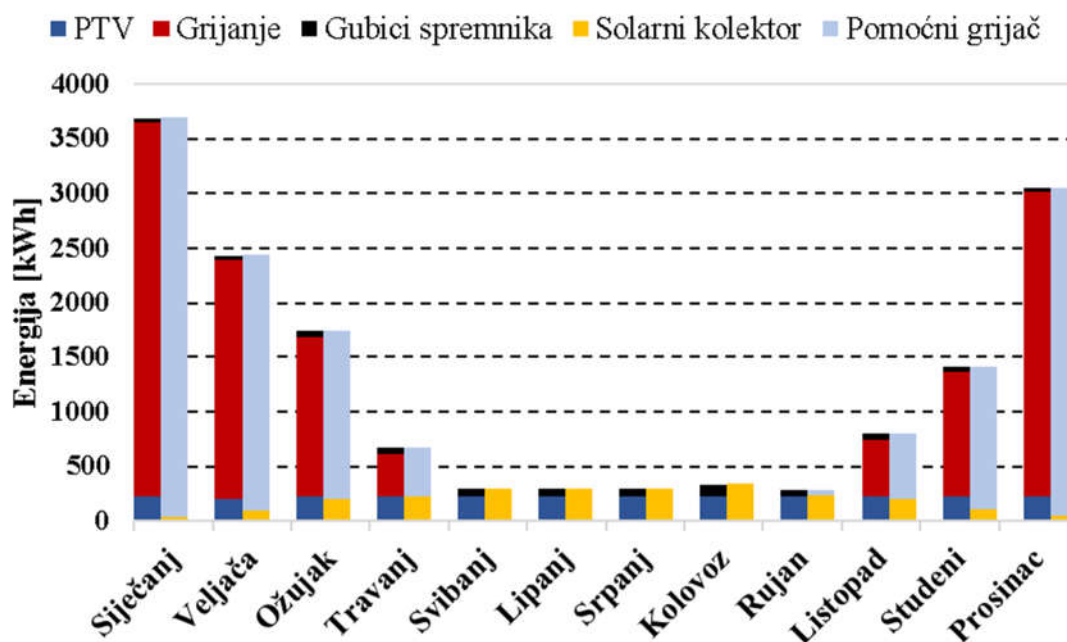
Razdoblje	$Q_{sto;W;dis}$ [kWh]	$V_{sto;use;W}$ [l]	$Q_{sto,H;dis}$ [kWh]	$Q_{sto;ls;tot}$ [kWh]	$Q_{sto;sol;in}$ [kWh]	η_{sol} [%]	$Q_{H,sto,bu,in}$ [kWh]
Godina	2714,1	51737,8	11875,2	719,8	2385,7	42,5	12925,1
Siječanj	230,5	4439,1	3421,3	38	43,1	30,5	3648
Veljača	208,2	3978,6	2183,4	42,7	93,2	37,3	2342,9
Ožujak	230,5	4450,8	1450,3	58,3	206,9	40,9	1533,6
Travanj	223,1	4488,9	386,4	60,4	220,6	41,5	450,1
Svibanj	230,5	4610,9	0	66,9	297,7	43,9	0
Lipanj	223,1	4247,0	0	69,4	293,3	44,2	0
Srpanj	230,5	4516,6	0	69,2	299,2	45,5	0
Kolovoz	230,5	3280,6	0	102,7	339,2	41,8	0
Rujan	223,1	4374,2	0	64,7	242,2	44,5	38,9
Listopad	230,5	4635,8	509,5	59,8	201,2	43,6	597,6
Studeni	223,1	4292,7	1140,1	47	107,1	44,2	1302,2
Prosinac	230,5	4422,6	2784,3	39,6	50,2	34,8	3002,6

Iz rezultata je vidljivo da u isporučenoj toplinskoj energiji dominira energija koja se isporučuje sustavu grijanja. Potrebe za grijanjem postoje od listopada do travnja, dok od svibnja do rujna sustav isporučuje energiju samo za potrebe potrošne tople vode. Solarni sustav u razdoblju od svibnja do kolovoza u potpunosti pokriva energetske potrebe termotehničkog sustava. Zbog velikih potreba za energijom sustava grijanja i malog doprinosa solarnog sustava u zimskim mjesecima udio proizvedene energije solarnog sustava u ukupnoj energiji je nizak. Za korištene parametre sustava u svakom vremenskom koraku iz spremnika je isporučena sva potrebna toplinska energija za grijanje i PTV na temperaturi jednakoj ili višoj od minimalne potrebne.

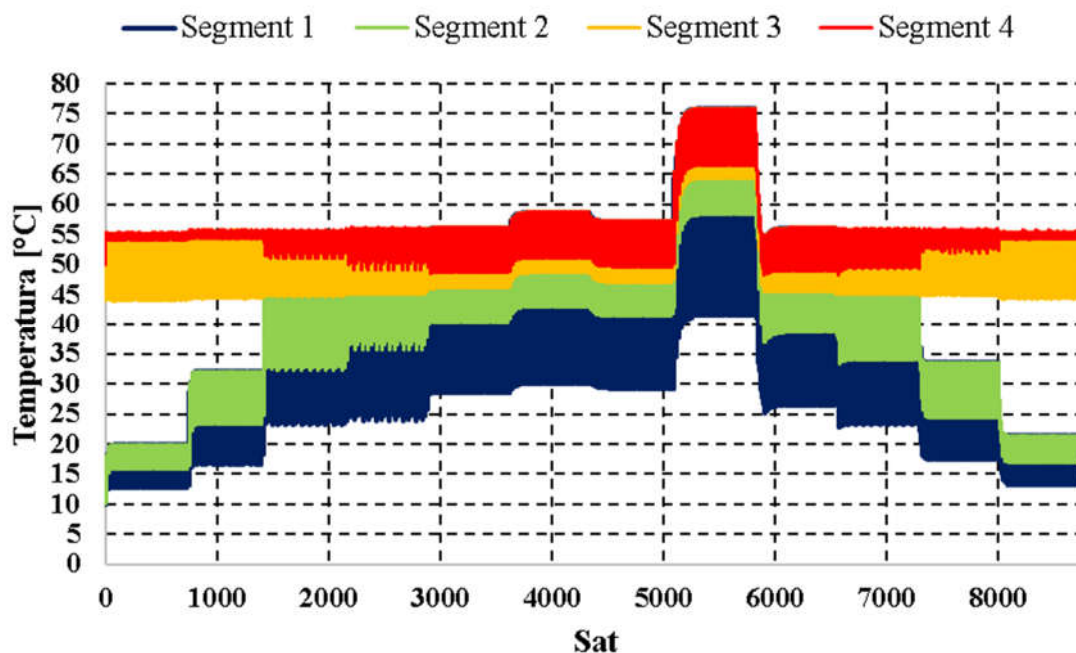
Učinkovitost solarnog sustava proračunata je kao omjer u spremniku akumulirane toplinske energije solarnog sustava i ukupne dozračene sunčeve energije na ravninu kolektora u promatranom razdoblju.



Slika 19. Udjeli akumulirane i isporučene toplinske energije iz spremnika na godišnjoj razini za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$



Slika 20. Mjesečna akumulirana i isporučena energija iz spremnika za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$



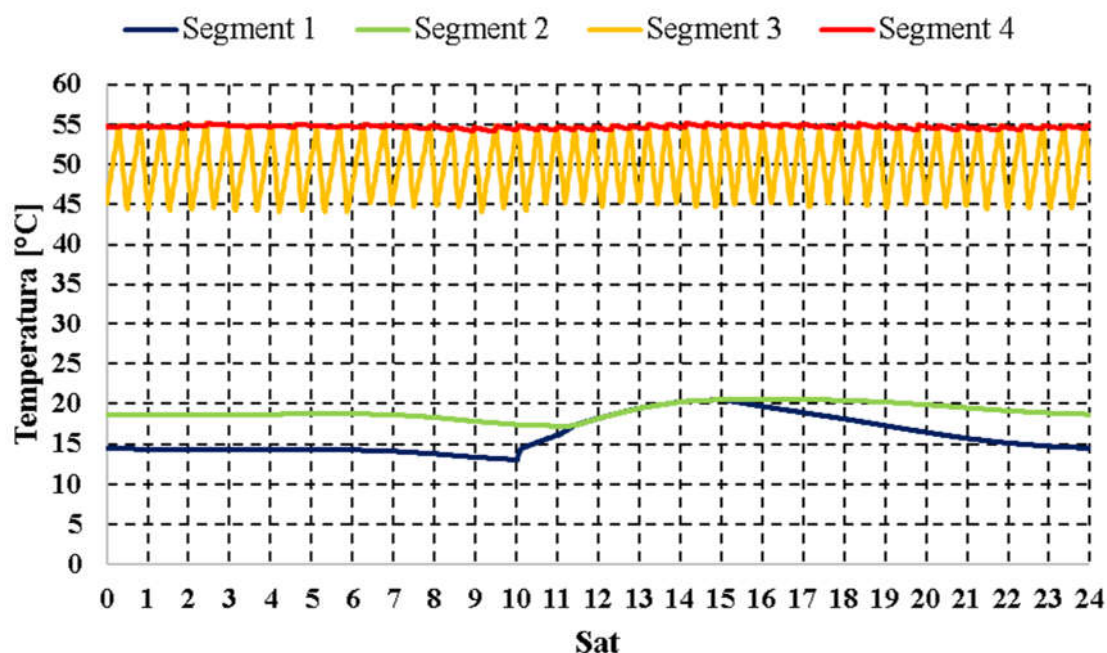
Slika 21. Temperatura spremnika u jednoj godini za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

Na Slici 21 prikazan je temperaturni profil segmenata spremnika kroz godinu na kojem se jasno mogu razlikovati pojedini mjeseci u godini. Zbog korištenja jednakih dnevnih podataka za karakteristični dan kroz cijeli mjesec, na početku svakog mjeseca javljaju se prijelazi temperatura u novi režim koji se nakon nekoliko dana ustali i ciklički ponavlja do kraja mjeseca. U ljetnim mjesecima doprinos solarnog sustava uzrokuje povišene temperature nižih dijelova spremnika, zbog čega su gubici akumulacijskog spremnika viši u tom razdoblju. To posebno dolazi do izražaja u kolovozu, kad je uslijed velikog solarnog doprinosa za korištenu orijentaciju kolektora temperatura i u gornjim dijelovima spremnika izrazito visoka. Zbog visoke temperature vode u najvišem segmentu spremnika u kolovozu je isporučen najmanji volumen vode za potrebe PTV-a.

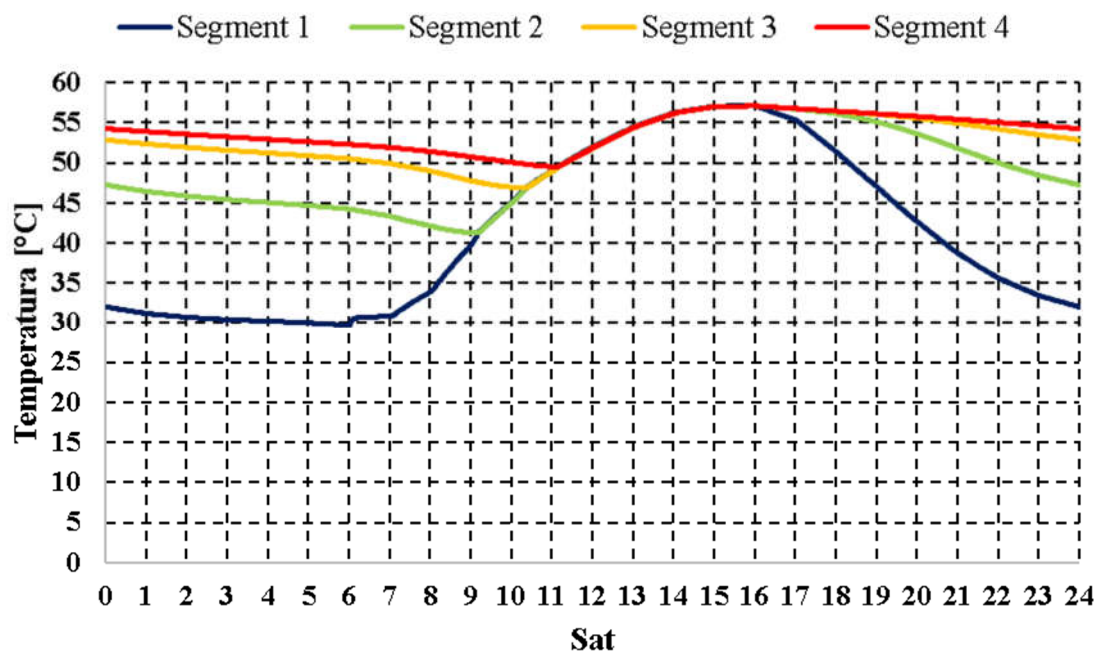
Na Slici 22 prikazan je temperaturni profil spremnika za 20. siječnja. Segment 3, u kojem su smješteni izmjenjivači topline pomoćnog grijača i sustava grijanja, pod utjecajem regulacije pomoćnog grijača ciklički se zagrijava i hladi unutar regulacijskog raspona. Donji dijelovi spremnika, koji nisu pod utjecajem pomoćnog grijača, blago se zagrijavaju solarnim doprinosom nakon čega se hlade uslijed nadopunjavanja spremnika svježom vodom.

Na slici 23 dan je temperaturni profil spremnika za 20. srpnja. Temperatura segmenta 3 čitav je dan iznad donje regulacijske granice pomoćnog grijača pa ne postoji potreba za radom pomoćnog grijača. U jutarnjim satima počinje zagrijavanje donjeg segmenta 1 toplinskom

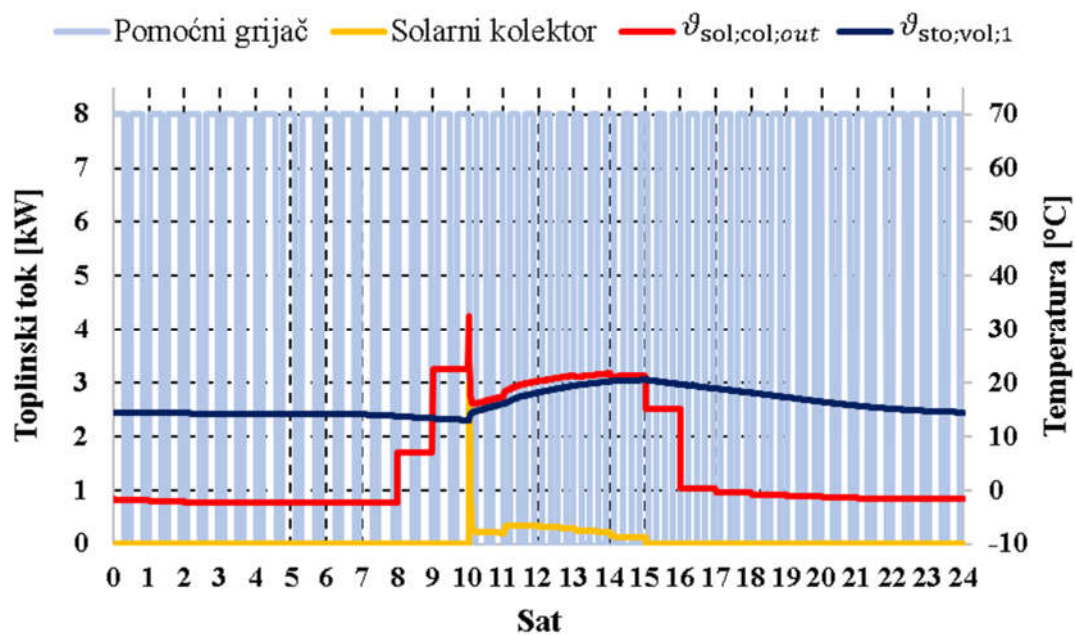
energijom solarnog sustava uslijed čega raste temperatura segmenta 1, a zatim i svih ostalih segmenata. U večernjim satima temperatura u spremniku pada zbog smanjenog intenziteta sunčevog zračenja i odvođenja vode iz spremnika za potrebe PTV-a te zbog toplinskih gubitaka spremnika.



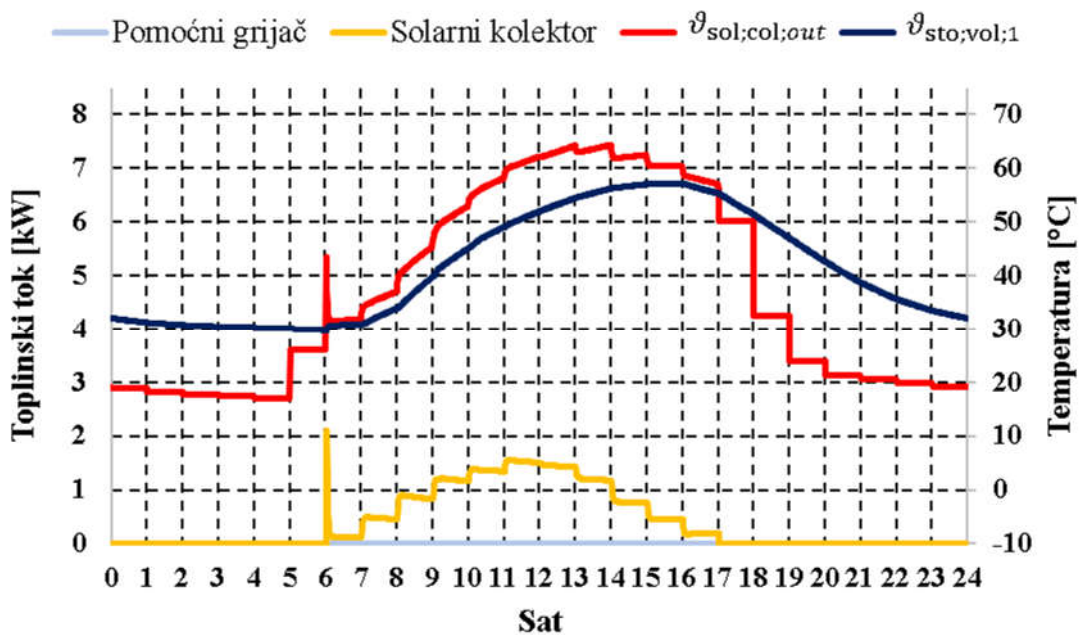
Slika 22. Temperatura spremnika 20. siječnja za zgradu s $Q_{H;nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$



Slika 23. Temperatura spremnika 20. srpnja za zgradu s $Q_{H;nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ kod dinamičke simulacije



Slika 24. Toplinski tok koji se predaje spremniku i relevantne temperature za regulaciju solarnog kruga 20. siječnja za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$



Slika 25. Toplinski tok koji se predaje spremniku i relevantne temperature za regulaciju solarnog kruga 20. srpnja za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

Na Slikama 24 i 25 prikazani su toplinski tokovi koje pomoćni grijač i solarni kolektor predaju akumulacijskom spremniku 20. siječnja i 20. srpnja. U siječnju pomoćni grijač u pulsovima spremniku predaje maksimalnu snagu od 8 kW. Početak i trajanje pulsa ovisi o temperaturi segmenta 3, prikazanoj na Slici 22 pri čemu se tijekom jednog pulsa segment zagrije s donje na gornju regulacijsku granicu pomoćnog grijača. Solarni kolektor predaje manji toplinski tok u usporedbi s grijačem, ali je predaje kontinuirano u središnjem dijelu dana. U srpnju solarni kolektor predaje puno veći toplinski tok i to kroz dulje vremensko razdoblje, dok pomoćni grijač u srpnju ne radi.

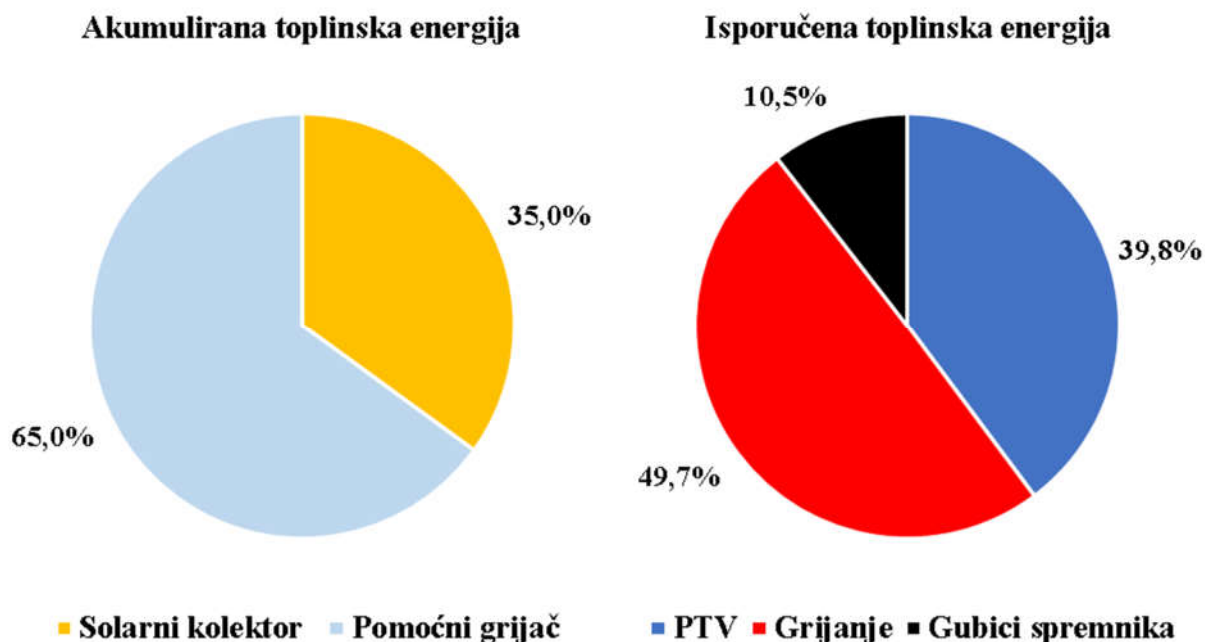
Na Slikama 24 i 25 prikazane su i temperature fluida na izlazu iz solarnog kolektora i temperature segmenta spremnika u kojem je smješten izmjenjivač topline solarnog kruga. Iz prikazanih temperatura vidljivo je da se pumpa solarnog kruga uključi kad je temperatura na izlazu iz kolektora za više od 10 °C viša od temperature u spremniku. U tom trenutku trenutno se preda velik iznos toplinskog toka nakon čega temperatura fluida kolektorskog kruga padne te se dalje kontinuirano predaje manji iznos toplinskog toka. Toplinska energija solarnog kruga predaje se spremniku sve dok postoji razlika između temperatura na izlazu iz kolektora i u spremniku veća od 1 °C. Kad temperaturna razlika padne ispod 1 °C, pumpa se gasi i nema predaje energije solarnog sustava spremniku sve dok se ponovno ne postigne razlika od 10 °C. Temperatura na izlazu iz kolektora skokovito se mijenja u svakom satu zbog korištenih satnih meteoroloških podataka.

5.1.3. Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje 20 kWh/m²Tablica 5. Rezultati dinamičke simulacije za zgradu s $Q_{H,nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

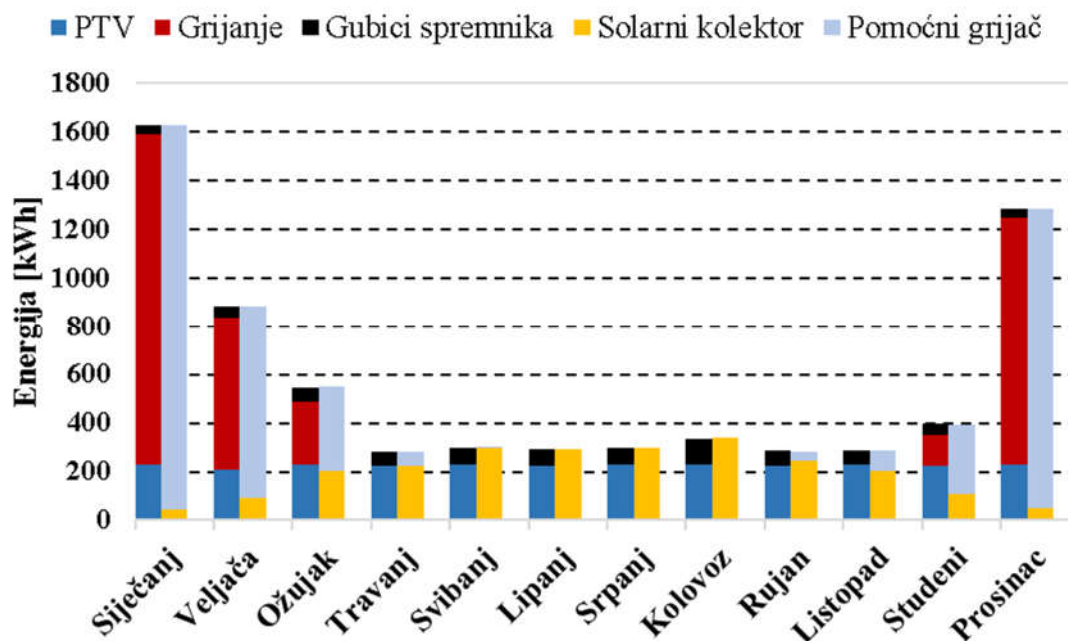
Razdoblje	$Q_{sto;W;dis}$ [kWh]	$V_{sto;use;W}$ [l]	$Q_{sto;H;dis}$ [kWh]	$Q_{sto;ls;tot}$ [kWh]	$Q_{sto;sol;in}$ [kWh]	η_{sol} [%]	$Q_{H,sto,bu,in}$ [kWh]
Godina	2714,1	52330,5	3392,5	716,7	2387,5	42,5	4437,4
Siječanj	230,5	4396,3	1359,6	39,4	41,5	30,4	1589,9
Veljača	208,2	4023,8	630,2	43,0	92,1	37,4	790,2
Ožujak	230,5	4706,4	259,8	58,4	202,8	40,2	347,5
Travanj	223,1	4625,1	0	58,2	223	41,9	57,1
Svibanj	230,5	4609,1	0	67,1	296,8	43,9	2,9
Lipanj	223,1	4247	0	69,2	293,1	44,2	0
Srpanj	230,5	4516,6	0	69,0	299,0	45,5	0
Kolovoz	230,5	3280,6	0	102,5	339,0	41,8	0
Rujan	223,1	4374,2	0	64,5	242,0	44,5	38,9
Listopad	230,5	4776,7	0	58,1	203,5	44,1	84,5
Studeni	223,1	4369,7	127,4	46,8	106,2	44,5	289,4
Prosinac	230,5	4404,9	1015,5	40,7	48,5	34,7	1237

U Tablici 5 dani su godišnji i mjesečni rezultati proračuna pri referentnim parametrima simulacije i godišnjoj potrebnoj toplinskoj energiji za grijanje od 20 kWh/m². Na Slikama 26 i 27 prikazani su mjesečni i godišnji rezultati akumulirane i isporučene energije akumulacijskog spremnika. U usporedbi sa slučajem pri potrebnoj energiji za grijanjem od 70 kWh/m²a, u akumuliranoj toplinskoj energiji veći je udio doprinosa solarnog kolektora zbog smanjenih potreba za grijanjem koje su uglavnom pokrivene pomoćnim grijačem. Iznos akumulirane toplinske energije solarnog sustava gotovo je jednak kao pri većem toplinskom opterećenju. Cjelokupne energetske potrebe od svibnja do kolovoza pokrivene su solarnim doprinosom, kao i kod većeg toplinskog opterećenja. Toplinski gubici spremnika također su gotovo jednaki kao kod slučaja s većim toplinskim opterećenjem što je rezultat vrlo sličnih temperaturnih profila spremnika u dva simulirana slučaja. U oba slučaja gornji je dio spremnika držan unutar jednakog regulacijskog raspona pomoćnog grijača, a donji se grije gotovo jednakim solarnim

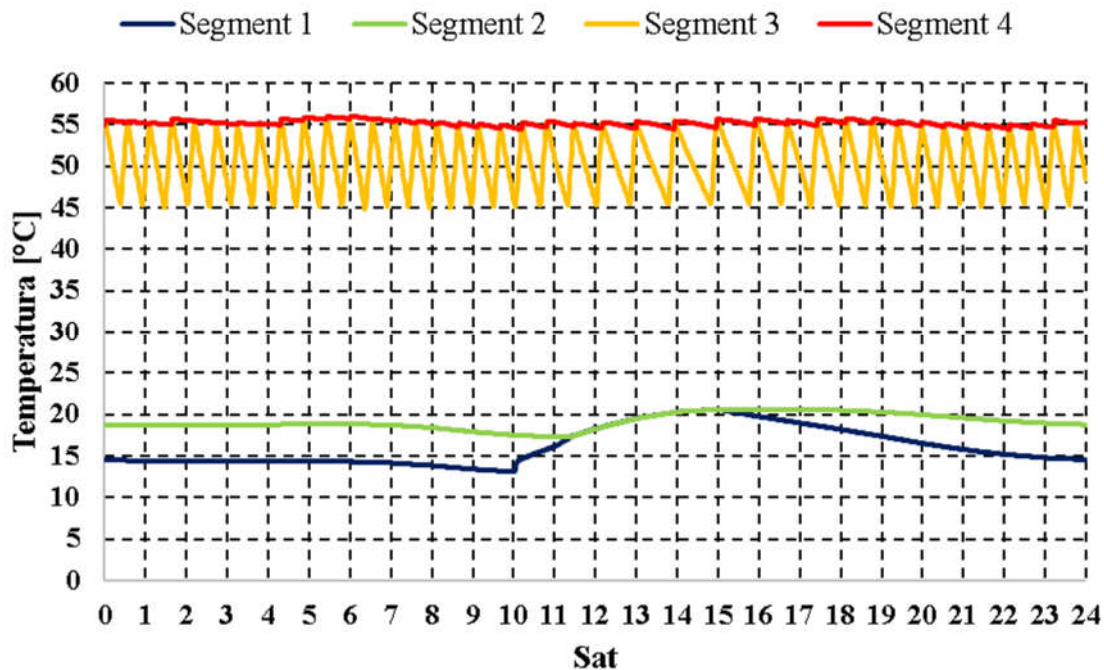
doprinosom i hladi gotovo jednakom količinom svježe vode. U svakom vremenskom koraku iz spremnika je isporučena sva potrebna toplinska energija za grijanje i PTV pri temperaturi jednakoj ili višoj od minimalne potrebne.



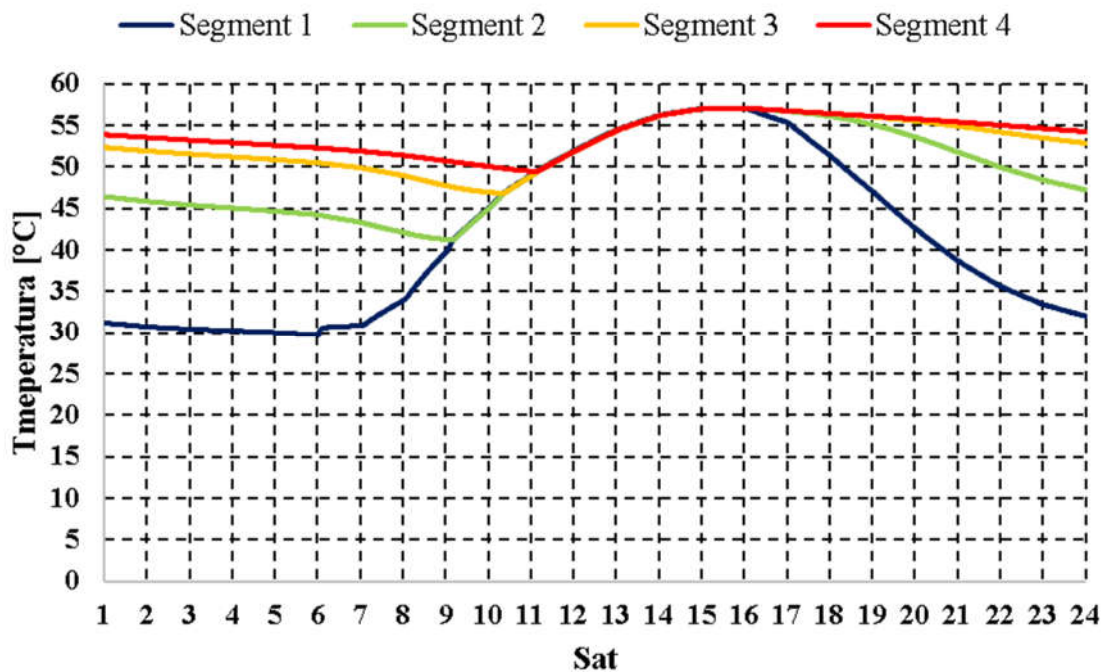
Slika 26. Udjeli akumulirane i isporučene toplinske energije iz spremnika na godišnjoj razini za zgradu s $Q_{H;nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$



Slika 27. Mjesečna akumulirana i isporučena energija za zgradu s $Q_{H;nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$



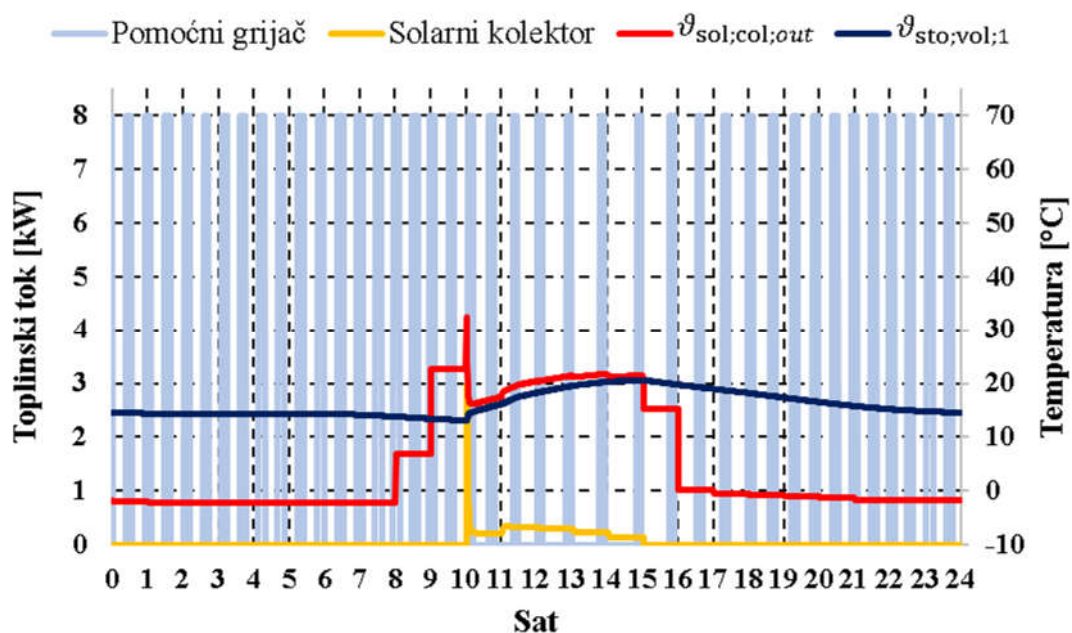
Slika 28. Temperatura spremnika 20. siječnja za zgradu s $Q_{H;nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$



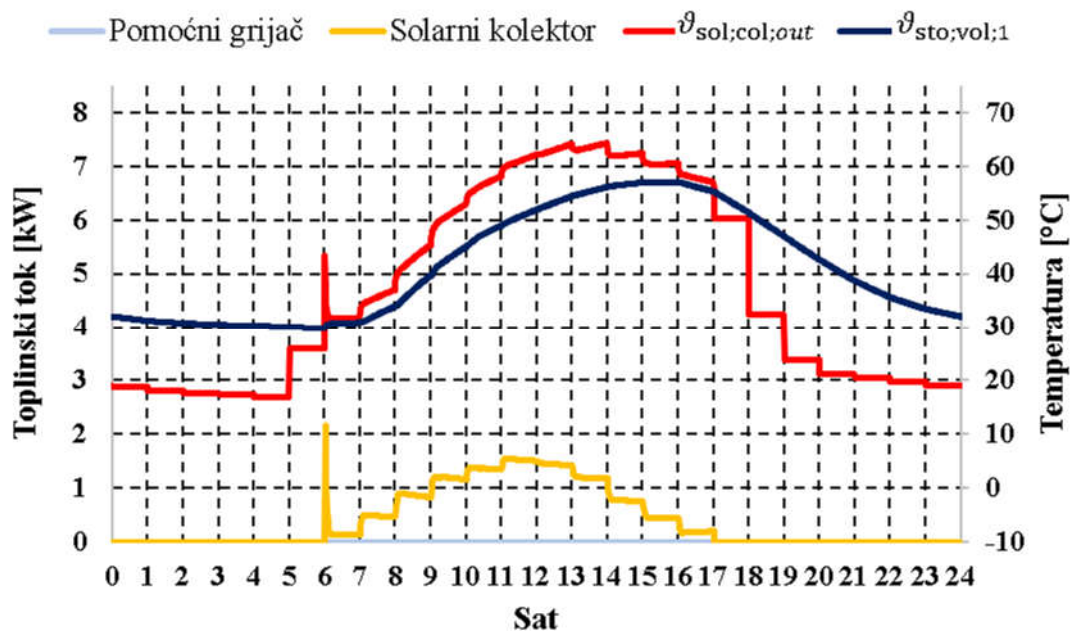
Slika 29. Temperatura spremnika 20. srpnja za zgradu s $Q_{H;nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

Na Slikama 28 i 29 prikazani su temperaturni profili spremnika 20. siječnja i 20. srpnja. Temperature segmenata 1 i 2 u siječnju su gotovo jednake kao kod slučaja s većim opterećenjem, dok se temperatura segmenta 3 također kreće između regulacijskog raspona

pomoćnog grijača, ali je broj ciklusa zagrijavanja i hlađenja manji. Kod profila 20. srpnja nema zamjetnih razlika u odnosu na profil pri toplinskom opterećenju od $70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ zbog jednakih toplinskih potreba za pripremu PTV-a i u tom razdoblju nepostojećih potreba za grijanjem.



Slika 30. Toplinski tok koji se predaje spremniku i relevantne temperature za regulaciju solarnog kruga 20. siječnja za zgradu s $Q_{\text{H;nd}} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$



Slika 31. Toplinski tok koji se predaje spremniku i relevantne temperature za regulaciju solarnog kruga 20. srpnja za zgradu s $Q_{\text{H;nd}} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

Na Slikama 30 i 31 prikazani su toplinski tokovi koje pomoćni grijač i solarni kolektor predaju akumulacijskom spremniku 20. siječnja i 20. srpnja. Toplinski tok koji predaje solarni kolektor za oba je razdoblja približno jednak rezultatima kod većeg toplinskog opterećenja. U srpnju i u ovom slučaju nema potrebe za radom pomoćnog grijača. Broj paljenja pomoćnog grijača u siječnju je manji i zagrijavanja su kraćeg trajanja u odnosu na slučaj kod godišnjih potreba za grijanjem od $70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, što se može zaključiti i usporedbom Slika 22 i 28. To je rezultat smanjenog odvođenja toplinske energije iz segmenta 3 pri čemu se on tijekom akumulacije maksimalnog iznosa toplinskog toka pomoćnog grijača brže zagrijava, a tijekom prekida rada pomoćnog grijača sporije hladi.

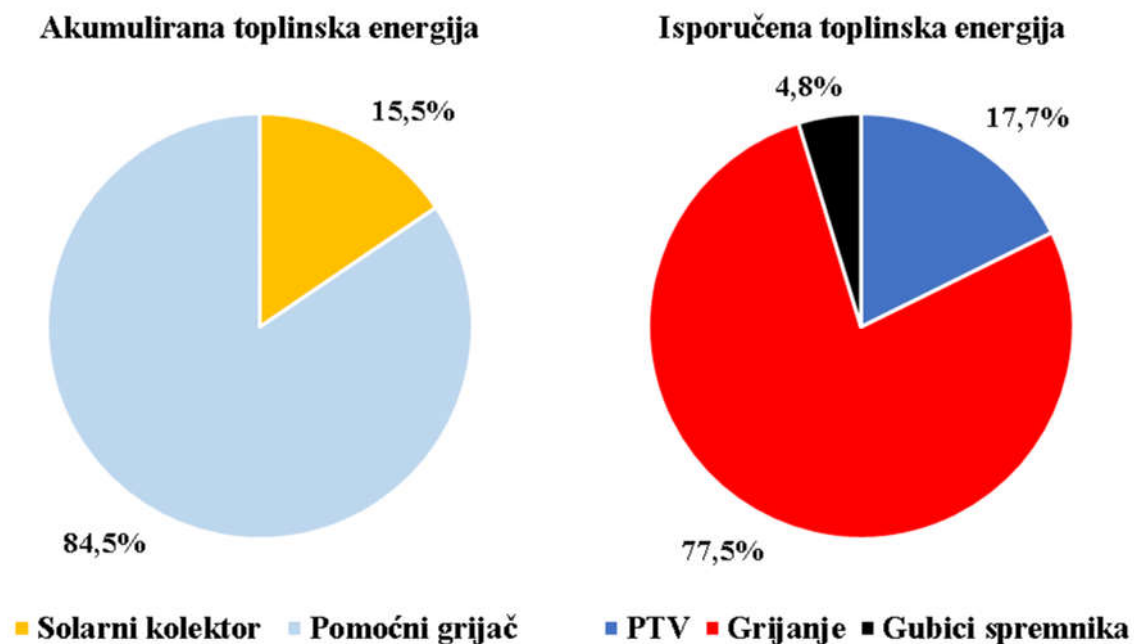
5.2. Satni proračun – model sa stratifikacijom temperature u spremniku

5.2.1. Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje 70 kWh/m^2

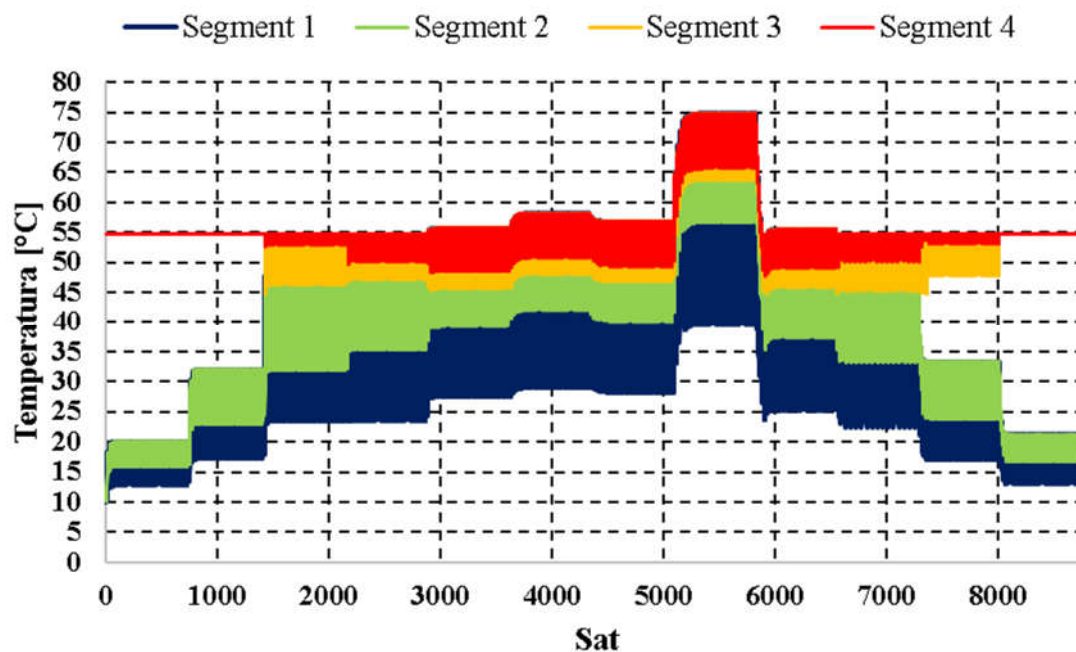
Tablica 6. Rezultati proračuna po satnoj metodi sa stratifikacijom temperature u spremniku za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

Razdoblje	$Q_{sto;W;dis}$ [kWh]	$V_{sto;use;W}$ [l]	$Q_{sto;H;dis}$ [kWh]	$Q_{sto;ls;tot}$ [kWh]	$Q_{sto;sol;in}$ [kWh]	η_{sol} [%]	$Q_{H,sto,bu,in}$ [kWh]
Godina	2714,1	51883,8	11875,2	729,3	2380,8	42,4	12935,9
Siječanj	230,5	4435,2	3421,3	41	43,6	31,9	3651
Veljača	208,2	4005,7	2183,4	44,9	93,1	37,8	2344,7
Ožujak	230,5	4451,1	1450,3	60,8	203,6	40,4	1539,4
Travanj	223,1	4468,9	386,4	61,1	218,4	41	452,7
Svibanj	230,5	4652,1	0	66,6	297,5	44	0
Lipanj	223,1	4273,6	0	69	292,9	44,1	0
Srpanj	230,5	4537,6	0	68,9	299	45,5	0
Kolovoz	230,5	3326,1	0	101,2	337,3	41,5	0
Rujan	223,1	4410,1	0	64	241,6	44,4	39
Listopad	230,5	4582,7	509,5	61	199	43,1	598,2
Studeni	223,1	4305,8	1140,2	48,6	105,5	44,2	1304,9
Prosinac	230,5	4434,9	2784,3	42,1	49,4	35,4	3006,1

U Tablici 6 i na Slici 32 dani su godišnji i mjesečni rezultati satnog proračuna sustava pri referentnim parametrima proračuna i godišnjoj potrebnoj toplinskoj energiji za grijanje od 70 kWh/m^2 . S obzirom na to da su toplinske energije koje je iz spremnika potrebno isporučiti podsustavima PTV-a i grijanja ulazni podaci proračuna jednaki kod svih korištenih metoda i da je u svakom vremenskom koraku isporučena sva potrebna toplinska energija za grijanje i PTV, vrijednosti isporučene energije za grijanje i PTV identične su vrijednostima kod dinamičke simulacije. Ostale vrijednosti iz Tablice 6 vrlo su slične vrijednostima dobivenim dinamičkom simulacijom te je udio proizvedene energije solarnog sustava proračunat ovom metodom gotovo jednak udjelu proračunatim dinamičkom simulacijom.



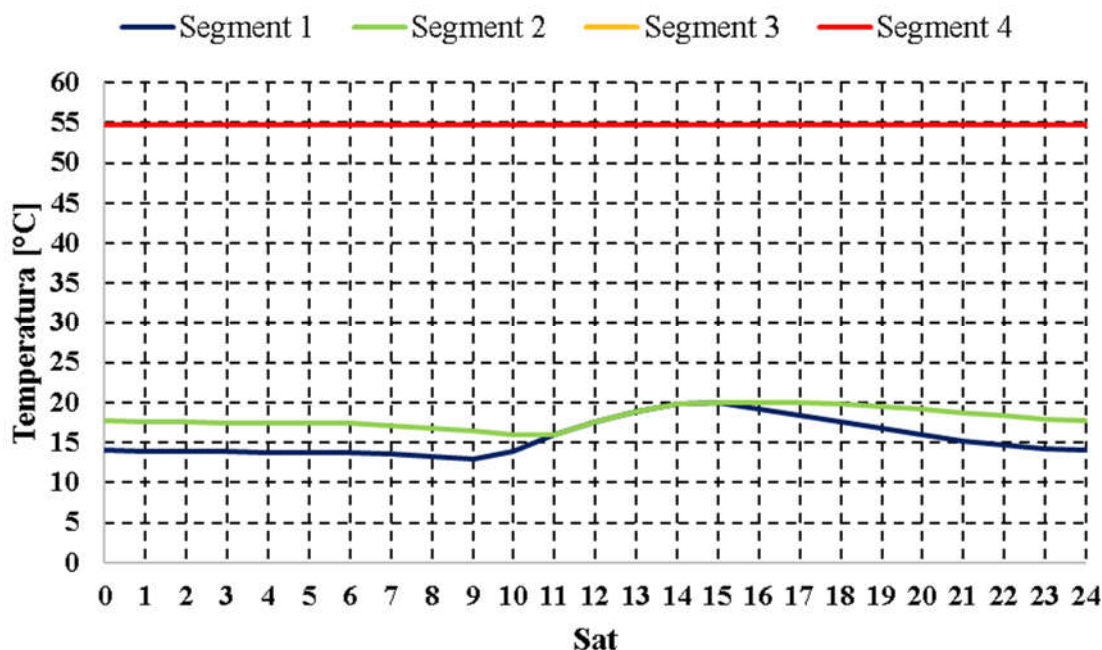
Slika 32. Udjeli akumulirane i isporučene toplinske energije iz spremnika na godišnjoj razini za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – satna metoda sa stratifikacijom temperature u spremniku



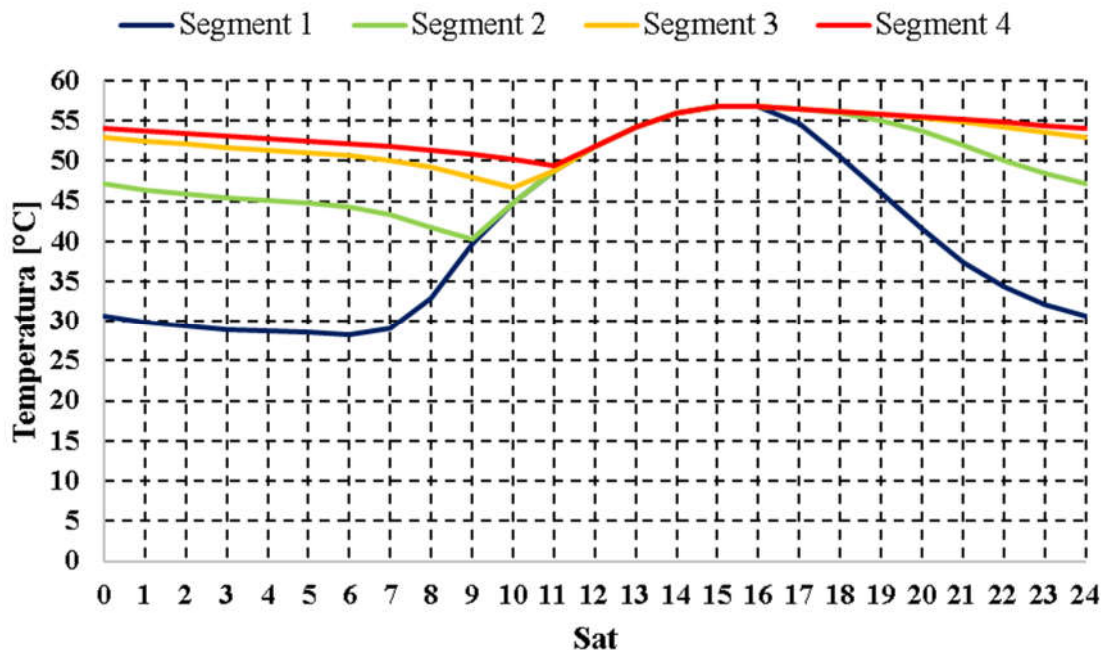
Slika 33. Godišnji temperaturni profil spremnika za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – satna metoda sa stratifikacijom temperature u spremniku

Na Slici 33 prikazan je godišnji temperaturni profil segmenata spremnika proračunat satnom metodom sa stratificiranim spremnikom. Kao i kod dinamičke simulacije, temperaturni profili ciklički se ponavljaju po danima unutar jednog mjeseca. Rasponi temperatura segmenata unutar pojedinog mjeseca slični su onima kod dinamičke simulacije, uz iznimku dijela spremnika grijanog pomoćnim grijačem u siječnju, veljači i prosincu. Pomoćni grijač zbog načina na koji je kod ove metode modelirana regulacija, velikih energetske potreba i relativno grubog vremenskog koraka od jednog sata u tim mjesecima radi u svakom satu pri čemu preda energiju potrebnu za postizanje gornje granice temperaturnog raspona regulacije grijača. Temperatura segmenata 3 i 4 na kraju svakog vremenskog koraka jednaka je gornjoj regulacijskoj granici jer ne postoji vremenski korak u kojem bi se isporučila energija iz spremnika, a da se ne aktivira pomoćni grijač.

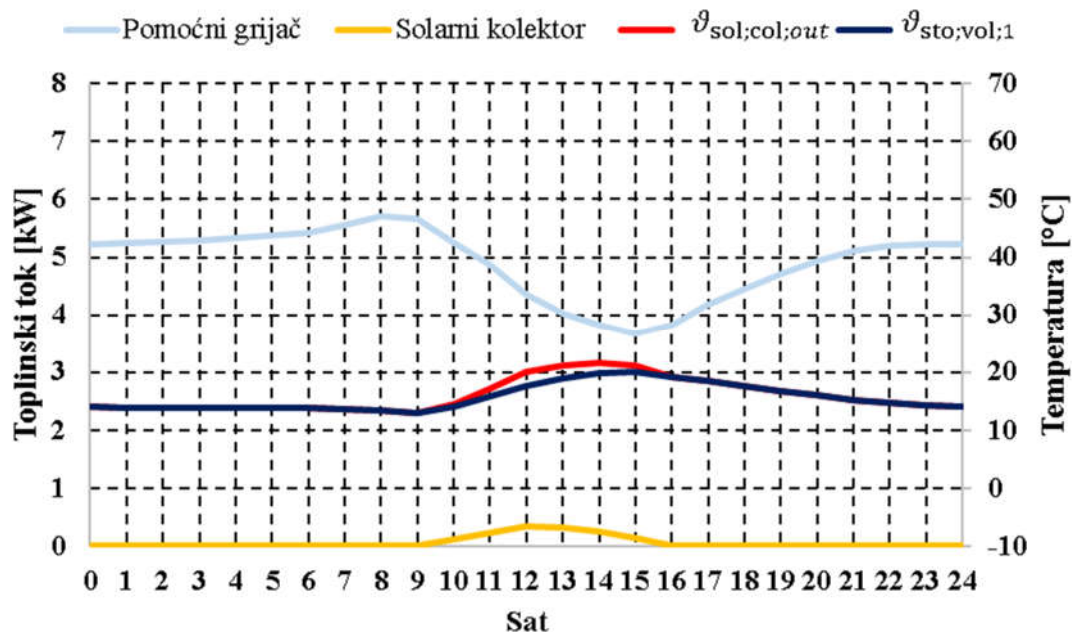
Na Slikama 34 i 35 prikazani su temperaturni profili spremnika za 20. siječanj i srpanj. Temperature segmenata 3 i 4 u siječnju su zbog prethodno opisanih razloga konstantno na gornjoj regulacijskoj granici pomoćnog grijača, dok su sve ostale vrijednosti temperatura za oba analizirana dana slične onima kod dinamičke simulacije. U usporedbi s profilima na slikama 22 i 23, krivulje temperatura proračunate ovom metodom zbog grubljeg vremenskog koraka imaju izražene lomove na svakom punom satu.



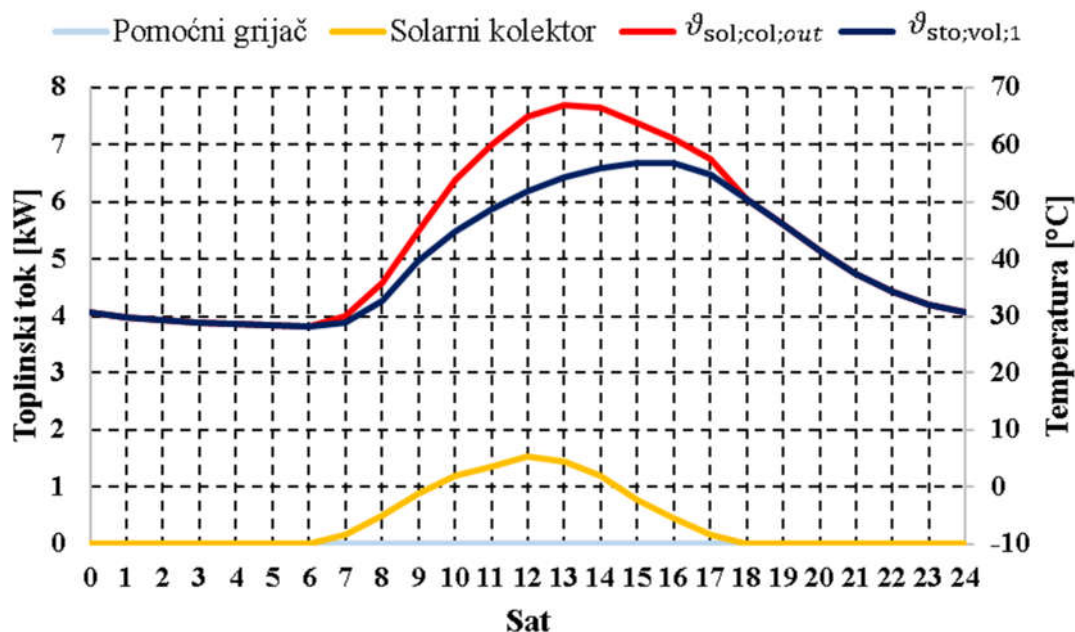
Slika 34. Temperatura spremnika 20. siječnja za zgradu s $Q_{H;nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – satna metoda sa stratifikacijom temperature u spremniku



Slika 35. Temperatura spremnika 20. srpnja za zgradu s $Q_{H;nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – satna metoda sa stratifikacijom temperature u spremniku



Slika 36. Toplinski tok koji se predaje spremniku 20. siječnja za zgradu s $Q_{H;nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – satna metoda sa stratifikacijom temperature u spremniku



Slika 37. Toplinski tok koji se predaje spremniku 20. srpnja za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – satna metoda sa stratifikacijom temperature u spremniku

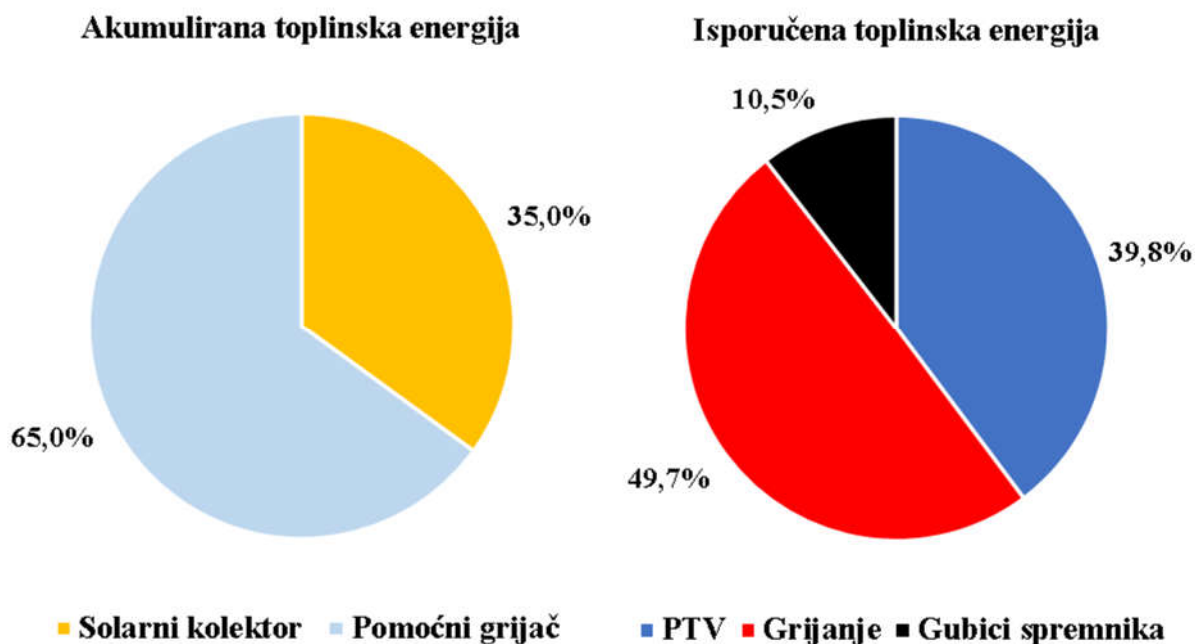
Na Slikama 36 i 37 prikazani su toplinski tokovi koje pomoćni grijač i solarni kolektor predaju akumulacijskom spremniku 20. siječnja i 20. srpnja. U srpnju pomoćni grijač ne radi, a u siječnju radi u svakom satu i predaje energiju potrebnu za grijanje, PTV i za zagrijavanje gornjeg dijela spremnika na gornju granicu regulacijskog raspona pomoćnog grijača. Toplinski tok pomoćnog grijača koji se akumulira u spremniku u svakom je satu niži od maksimalne snage grijača i može se shvatiti kao prosječna vrijednost pulsova prikazanih na Slici 24 u kojima grijač radi maksimalnom snagom i razdoblja između pulsova u kojima grijač ne radi. Solarni doprinos u srpnju veći je od onog u siječnju i predaje se spremniku u duljem vremenskom razdoblju kroz dan. U usporedbi s dinamičkom simulacijom, zbog različitog načina modeliranja regulacije solarnog kruga nema početnog impulsa visoke snage uzrokovanog paljenjem pumpe kod postizanja dovoljne temperatura na izlazu iz kolektora. Unatoč tome, iznosi toplinskog toka koji se predaje spremniku te trajanje solarnog doprinosa kroz dan slični su onima kod dinamičke simulacije. Temperatura na izlazu iz kolektora ne proračunava se ovim modelom u razdobljima kad nema isporuke toplinske energije solarnog kruga spremniku pa je u tim razdobljima vrijednost temperature $\vartheta_{\text{sol,col;out}}$ postavljena jednakom vrijednosti temperature segmenta spremnika u kojem je smješten izmjenjivač solarnog kruga.

5.2.2. Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje 20 kWh/m²

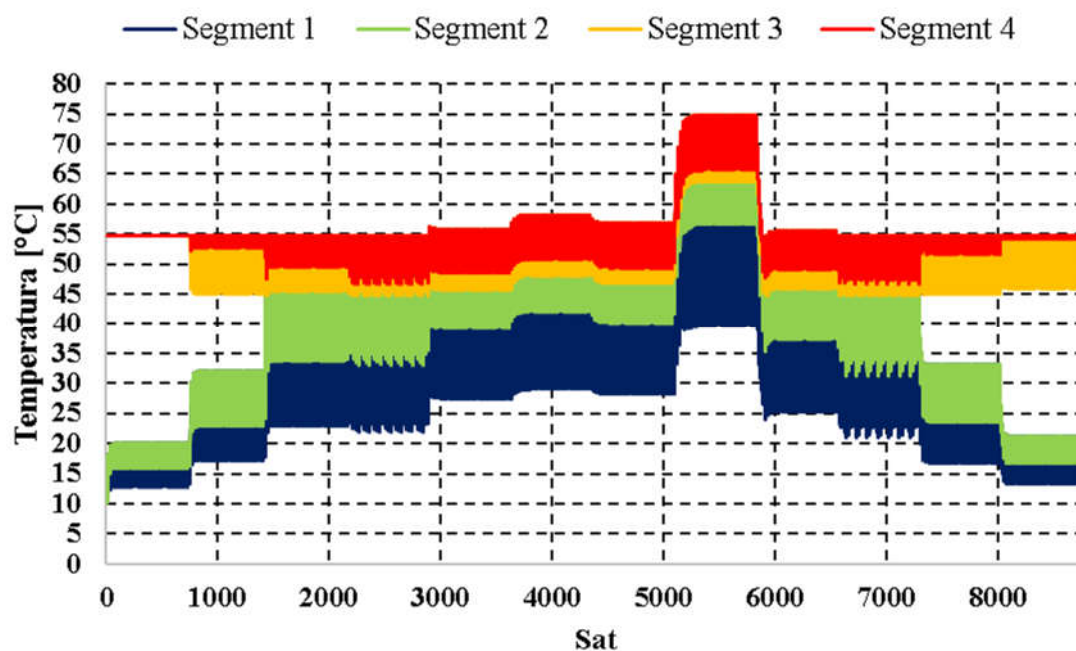
Tablica 7. Rezultati proračuna po satnoj metodi sa stratifikacijom temperature u spremniku za zgradu s $Q_{H;nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

Razdoblje	$Q_{sto;W;dis}$ [kWh]	$V_{sto;use;W}$ [l]	$Q_{sto;H;dis}$ [kWh]	$Q_{sto;ls;tot}$ [kWh]	$Q_{sto;sol;in}$ [kWh]	η_{sol} [%]	$Q_{H;sto;bu,in}$ [kWh]
Godina	2714,1	52536,0	3392,5	718,0	2388,0	42,6	4434,6
Siječanj	230,5	4435,2	1359,6	41,0	43,6	31,9	1589,3
Veljača	208,2	4036,0	630,2	43,9	93,3	37,9	790,2
Ožujak	230,5	4619,6	259,8	60,3	201,5	40	350,8
Travanj	223,1	4655,3	0	57,1	223,0	41,9	56,0
Svibanj	230,5	4645,3	0	66,7	297,3	44	1,6
Lipanj	223,1	4273,6	0	69,0	292,9	44,1	0
Srpanj	230,5	4537,6	0	68,9	299,0	45,5	0
Kolovoz	230,5	3326,1	0	101,2	337,3	41,5	0
Rujan	223,1	4410,1	0	64,0	241,6	44,4	39,0
Listopad	230,5	4785,3	0	57,8	203,2	44	80,8
Studeni	223,1	4373,6	127,4	46,4	106,0	44,4	288,7
Prosinac	230,5	4438,3	1015,5	41,8	49,5	35,4	1238

U Tablici 7 i na Slici 38 dani su godišnji i mjesečni rezultati satnog proračuna pri referentnim parametrima proračuna i godišnjoj potrebnoj toplinskoj energiji za grijanje od 20 kWh/m². U usporedbi s rezultatima prema istoj metodi za veće toplinsko opterećenje, zbog manjih energetske potrebe za grijanjem smanjena je isporučena energija pomoćnog grijača, dok je iznos akumulirane toplinske energije solarnog sustava približno jednak za oba opterećenja, kao što je i slučaj kod dinamičke simulacije. Godišnji udio solarnog doprinosa kod ove je metode gotovo jednak udjelu proračunatom dinamičkom simulacijom.



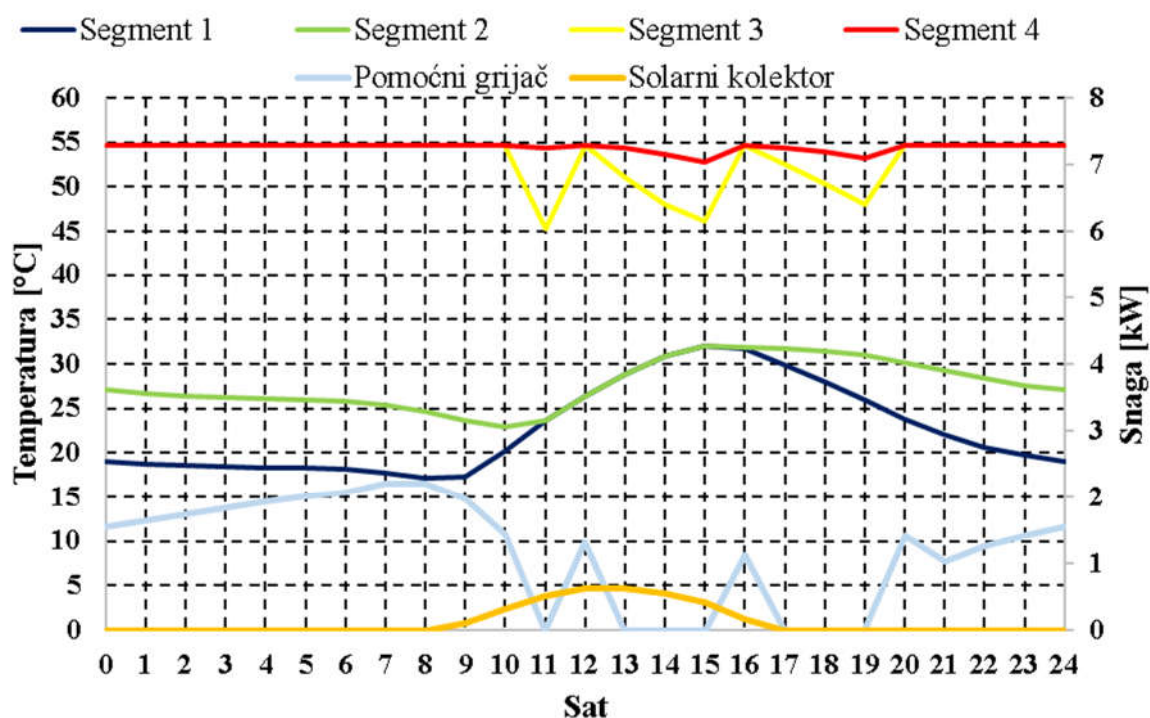
Slika 38. Udjeli akumulirane i isporučene toplinske energije iz spremnika na godišnjoj razini za zgradu s $Q_{H,nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – satna metoda sa stratifikacijom temperature u spremniku



Slika 39. Godišnji temperaturni profil spremnika za zgradu s $Q_{H,nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – satna metoda sa stratifikacijom temperature u spremniku

Na Slici 39 prikazan je godišnji temperaturni profil segmenata spremnika proračunat satnom stratificiranom metodom pri $20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ potrebne energije za grijanje. Temperaturni profil spremnika sličan je onome kod većeg toplinskog opterećenja, osim što je zbog manjih energetske potrebe temperatura dijela spremnika grijana pomoćnim grijačem konstantno na gornjoj regulacijskoj granici samo u siječnju, a u veljači i prosincu oscilira unutar regulacijskog raspona pomoćnog grijača.

Na Slici 40 prikazan je temperaturni profil spremnika i toplinski tokovi koji podsustav proizvodnje predaje spremniku 20. veljače. U satima kad pomoćni grijač radi, isporučenom energijom se gornji dio spremnika zagrijava do gornje granice regulacijskog raspona, a kad grijač ne radi, temperatura segmenta 3 pada, ali uvijek unutar regulacijskog raspona pomoćnog grijača jer bi se u suprotnom on aktivirao i temperatura bi opet narasla do gornje regulacijske granice. Na Slici 40 je također vidljiv porast temperature segmenata 1 i 2 u vrijeme kad postoji solarni doprinos i hlađenje donjeg dijela spremnika kad je solarni doprinos toplinske energije jednak nuli.



Slika 40. Temperatura i toplinski tokovi koji se predaju spremniku 20. veljače za zgradu s $Q_{H,nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – satna metoda sa stratifikacijom temperature u spremniku

5.3. Pojednostavljeni satni proračun – model sa spremnikom homogene temperature

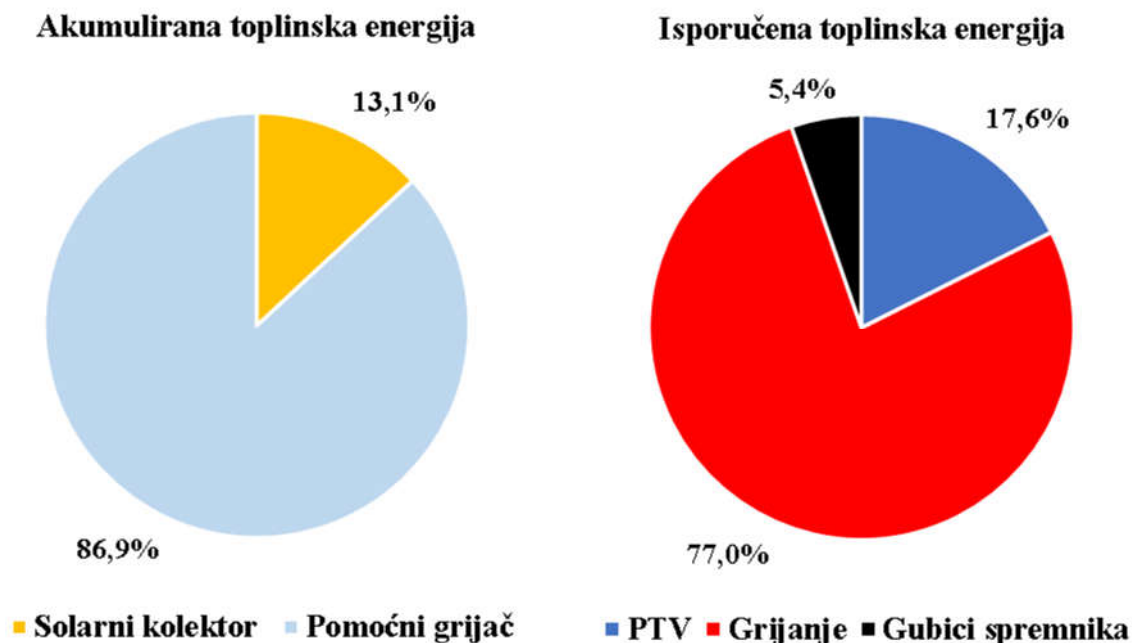
5.3.1. Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje 70 kWh/m^2

Tablica 8. Rezultati proračuna po pojednostavljenoj satnoj metodi sa homogenim spremnikom za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

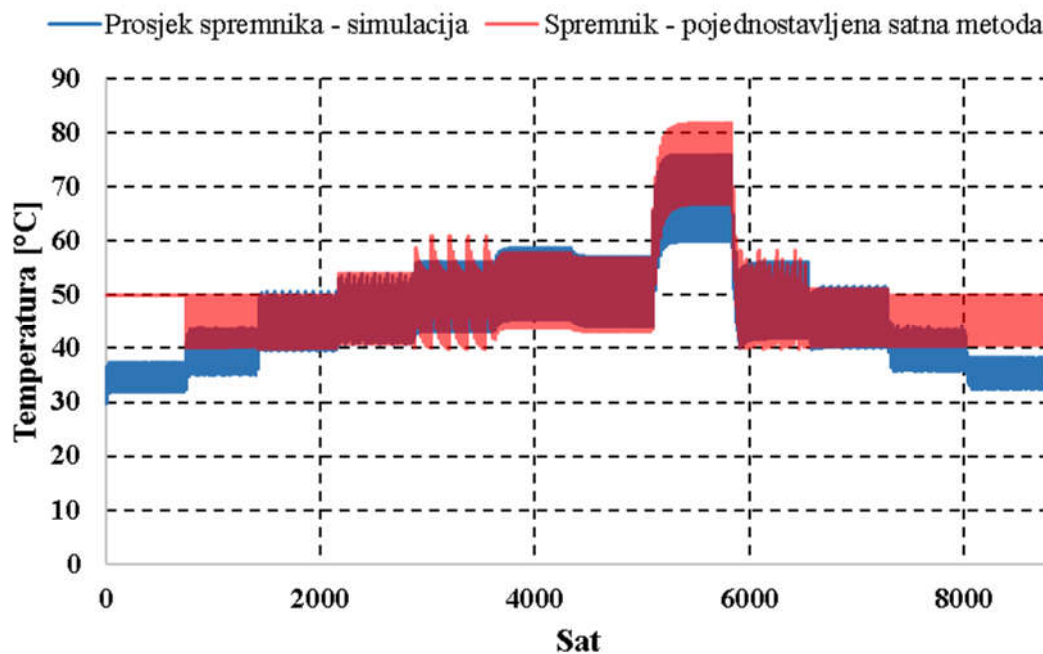
Razdoblje	$Q_{sto;W;dis}$ [kWh]	$Q_{sto;H;dis}$ [kWh]	$Q_{sto;ls;tot}$ [kWh]	$Q_{sto;sol;in}$ [kWh]	η_{sol} [%]	$Q_{H,sto,bu,in}$ [kWh]
Godina	2714,1	11875,2	825	2018,4	36,0	13396
Siječanj	230,5	3421,3	70,1	0	0	3721,8
Veljača	208,2	2183,4	63,3	30,9	12,5	2424
Ožujak	230,5	1450,3	70,1	186,8	37,1	1561,1
Travanj	223,1	386,4	67,8	182,5	34,3	494,8
Svibanj	230,5	0	70,1	281,3	41,6	21,3
Lipanj	223,1	0	67,8	290,5	43,8	0
Srpanj	230,5	0	70,1	300	45,6	0
Kolovoz	230,5	0	70,1	308,8	38,0	0
Rujan	223,1	0	67,8	223,1	41,0	61,7
Listopad	230,5	509,5	70,1	163,4	35,4	645,3
Studeni	223,1	1140,2	67,8	51,2	21,5	1378,4
Prosinac	230,5	2784,3	70,1	0	0	3087,5

U Tablici 8 i na Slici 41 dani su godišnji i mjesečni rezultati proračuna po pojednostavljenoj satnoj metodi pri referentnim parametrima proračuna i godišnjoj potrebnoj toplinskoj energiji za grijanje od 70 kWh/m^2 . U svim satima u godini isporučena je sva potrebna energija za grijanje i pripremu PTV-a pa su rezultati isporučenih energija podsustavu PTV-a i grijanja jednaki kao kod dinamičke simulacije. Ovom metodom pomoćnim grijačem zagrijava se čitav volumen spremnika na postavnu temperaturu što povećava prosječnu temperaturu vode u spremniku u odnosu na prethodno opisane metode proračuna. Zbog toga je prosječna učinkovitost solarnog kolektora kod ove metode niža u usporedbi s drugim metodama što je razlog manjem udjelu sunčeve energije u akumuliranoj toplinskoj energiji spremnika. Toplinski

gubici spremnika nešto su veći u odnosu na prethodno opisane metode zbog toga što se proračunavaju prema postavnoj temperaturi spremnika.



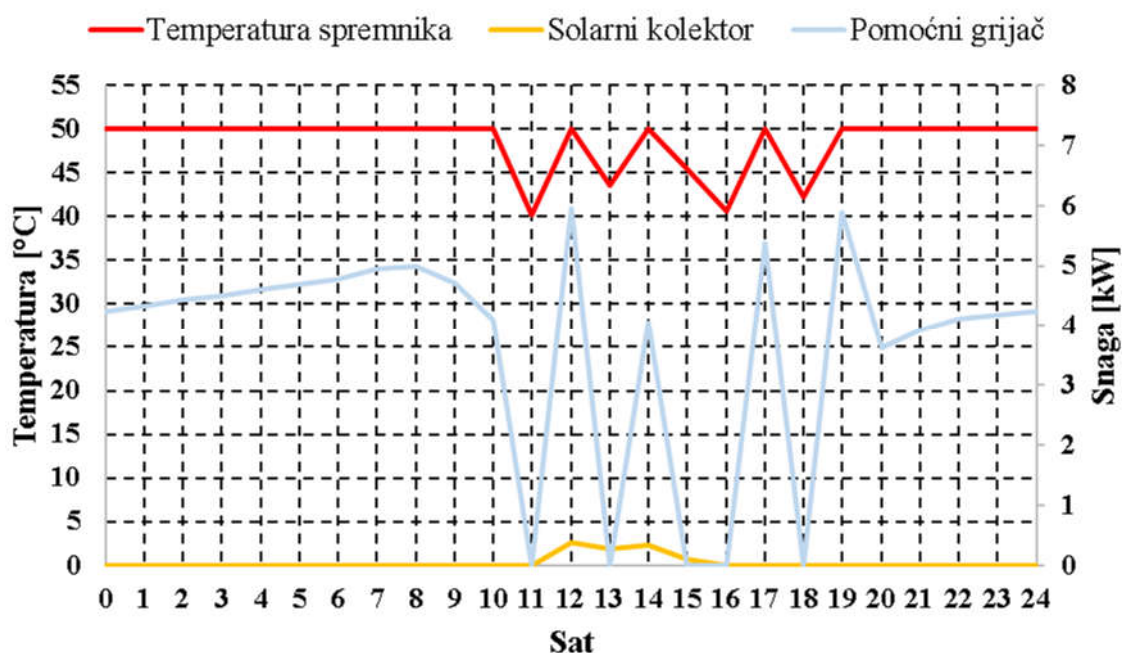
Slika 41. Udjeli akumulirane i isporučene toplinske energije iz spremnika na godišnjoj razini za zgradu s $Q_{H;nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – pojednostavljena satna metoda



Slika 42. Usporedba temperature spremnika prema proračunu po pojednostavljenoj satnoj metodi i prosječne temperature spremnika kod dinamičke simulacije pri $70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ potrebne energije za grijanje

Na Slici 42 prikazan je temperaturni profil spremnika u jednoj godini dobiven pojednostavljenom satnom metodom s homogenom temperaturom spremnika te je uspoređen s prosječnom temperaturom spremnika kod dinamičkog proračuna za isto toplinsko opterećenje sustava. Temperatura spremnika tijekom čitave godine ne pada ispod 40 °C na kojoj se pali pomoćni grijač i zagrijava spremnik do postavne temperature od 50 °C. U siječnju pomoćni grijač radi u svakom satu pa je temperatura spremnika na kraju svakog sata jednaka postavnoj temperaturi. U dijelu godine s većom dozračenom sunčevom energijom temperatura u spremniku uslijed doprinosa solarnog kolektora prelazi postavnu temperaturu pomoćnog grijača.

Na Slici 43 prikazani su temperaturni profil spremnika i toplinski tokovi koje predaju solarni kolektor i pomoćni grijač spremniku 20. veljače. Vidljivo je da kad pomoćni grijač ne radi temperatura u spremniku pada zbog odvođenja topline za grijanje i PTV i toplinskih gubitaka spremnika. Pomoćni grijač se zatim aktivira kako bi spriječio pad temperature ispod 40 °C te se spremnik ponovno zagrije do postavne temperature. Solarni doprinos kod ovog je razdoblja kratkotrajan i malen u odnosu na doprinos pomoćnog grijača.



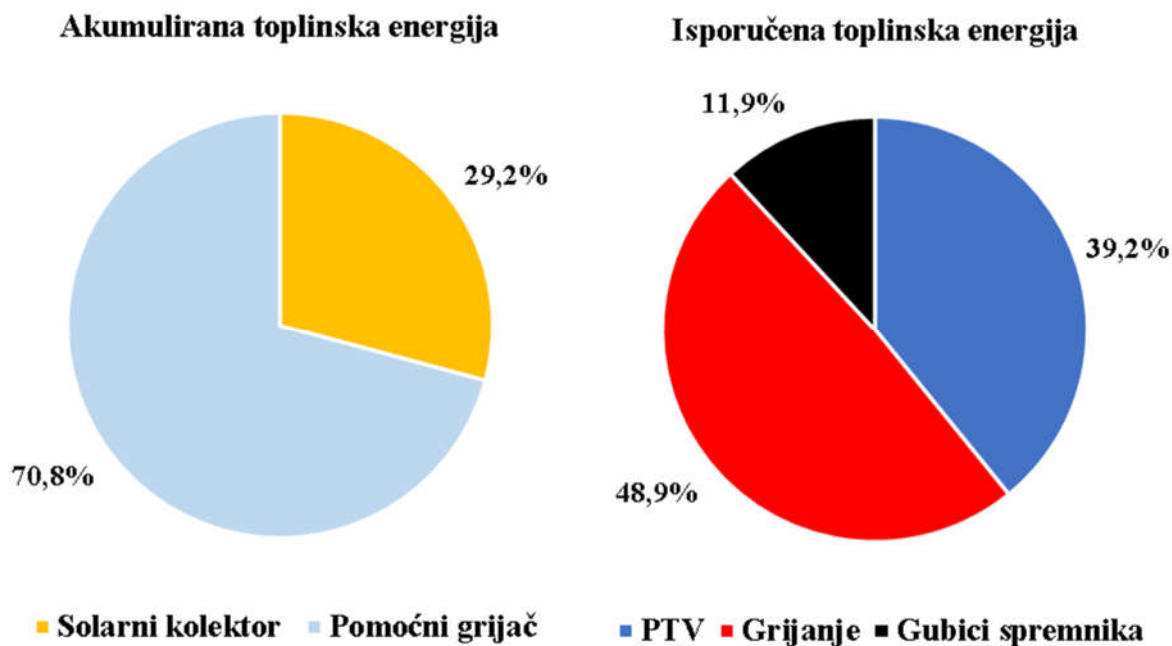
Slika 43. Temperatura i toplinski tokovi koji se predaju spremniku 20. veljače pri potrebnoj energiji za grijanje od 70 kWh/m²a – pojednostavljena satna metoda

5.3.2. Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje 20 kWh/m²

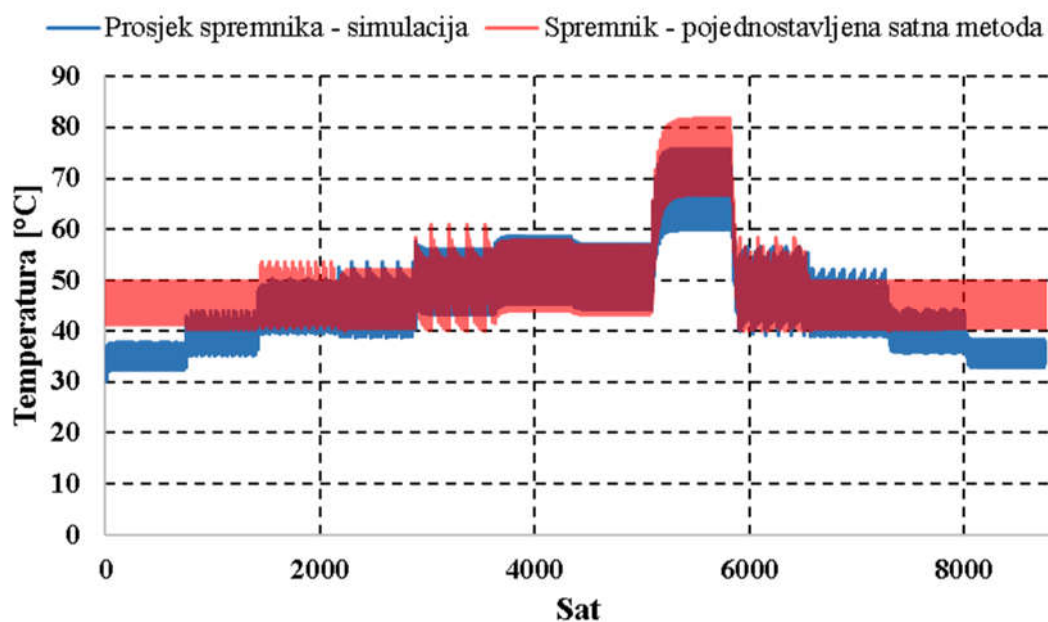
Tablica 9. Rezultati proračuna po pojednostavljenoj satnoj metodi sa homogenim spremnikom za zgradu s $Q_{H,nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

Razdoblje	$Q_{sto,W,dis}$ [kWh]	$Q_{sto,H,dis}$ [kWh]	$Q_{sto,ls,tot}$ [kWh]	$Q_{sto,sol,in}$ [kWh]	η_{sol} [%]	$Q_{H,sto,bu,in}$ [kWh]
Godina	2714,1	52536,0	825	2024,2	36,1	4907,4
Siječanj	230,5	4435,2	70,1	0	0	1660,1
Veljača	208,2	4036,0	63,3	36,7	14,9	864,9
Ožujak	230,5	4619,6	70,1	172,3	34,2	387,6
Travanj	223,1	4655,3	67,8	186,8	35,1	101,9
Svibanj	230,5	4645,3	70,1	282	41,7	21,2
Lipanj	223,1	4273,6	67,8	289,5	43,6	0
Srpanj	230,5	4537,6	70,1	300	45,6	0
Kolovoz	230,5	3326,1	70,1	308,8	38	0
Rujan	223,1	4410,1	67,8	223,1	41	61,7
Listopad	230,5	4785,3	70,1	178,7	38,7	121,1
Studeni	223,1	4373,6	67,8	46,3	19,4	369,8
Prosinac	230,5	4438,3	70,1	0	0	1319

U Tablici 9 i na Slici 44 dani su godišnji i mjesečni rezultati proračuna po pojednostavljenoj satnoj metodi sa homogenom temperaturom spremnika pri referentnim parametrima proračuna i godišnjoj potrebnoj toplinskoj energiji za grijanje od 20 kWh/m². Kao što je slučaj i kod proračuna pri većem toplinskom opterećenju, ovom metodom proračunati udio solarnog doprinosa je manji, a udio toplinskih gubitaka spremnika veći u usporedbi s dinamičkom simulacijom. Toplinski gubici identični su onima kod većeg toplinskog opterećenja jer je u oba slučaja postavna temperatura jednaka.



Slika 44. Udjeli akumulirane i isporučene toplinske energije iz spremnika na godišnjoj razini za zgradu s $Q_{H,nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – pojednostavljena satna metoda



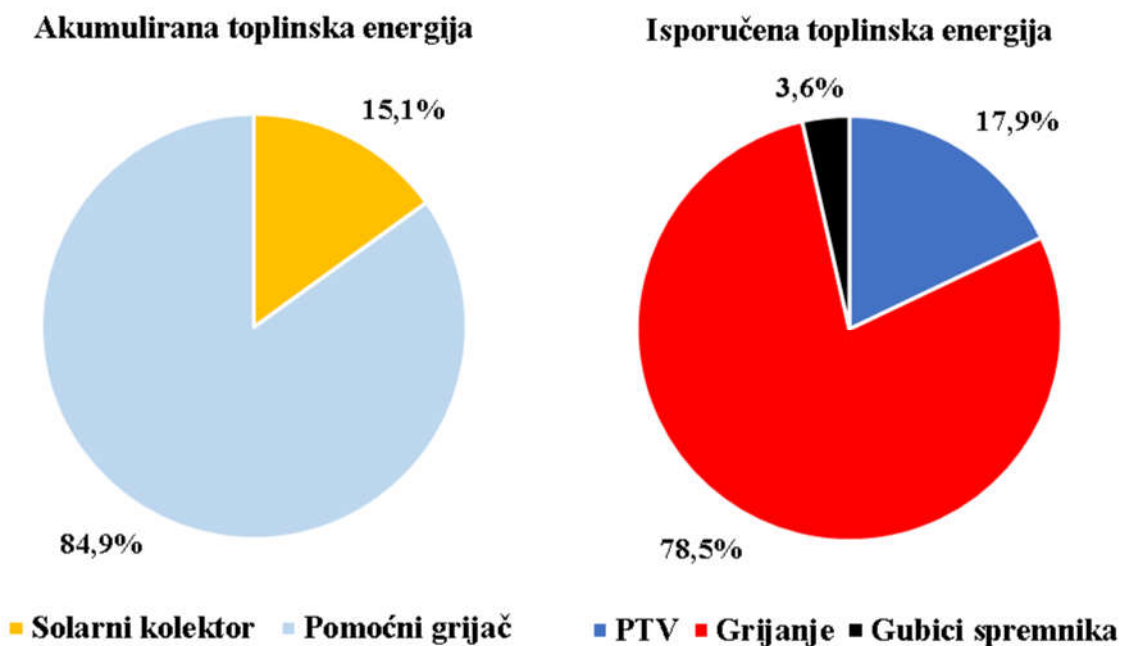
Slika 45. Usporedba temperature spremnika prema proračunu po pojednostavljenoj satnoj metodi i prosječne temperature spremnika kod dinamičke simulacije pri $20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ potrebne energije za grijanje

Na Slici 45 dan je godišnji temperaturni profil spremnika prema proračunu pojednostavljenom satnom metodom s homogenom temperaturom spremnika u usporedbi s prosječnom temperaturom spremnika prema dinamičkoj simulaciji pri jednakom toplinskom opterećenju od 20 kWh/m²a. Zbog manjeg toplinskog opterećenja, temperatura vode u spremniku oscilira i tijekom siječnja. U usporedbi s tim, temperatura gornjeg djela spremnika kod metode s stratificiranom temperaturom spremnika u siječnju ne oscilira zbog manjeg toplinskog kapaciteta grijanog dijela spremnika pri čemu pomoćni grijač radi u svakom satu siječnja, dok je u ovom slučaju energija uskladištena u čitavom spremniku dovoljna da u određenim satima rad pomoćnog grijača nije potreban

5.4. Mjesečni proračun prema normi HRN EN 15316-4-3:2017**5.4.1. Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje 70 kWh/m^2** **Tablica 10. Rezultati proračuna po mjesečnoj metodi za zgradu s $Q_{H,nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$**

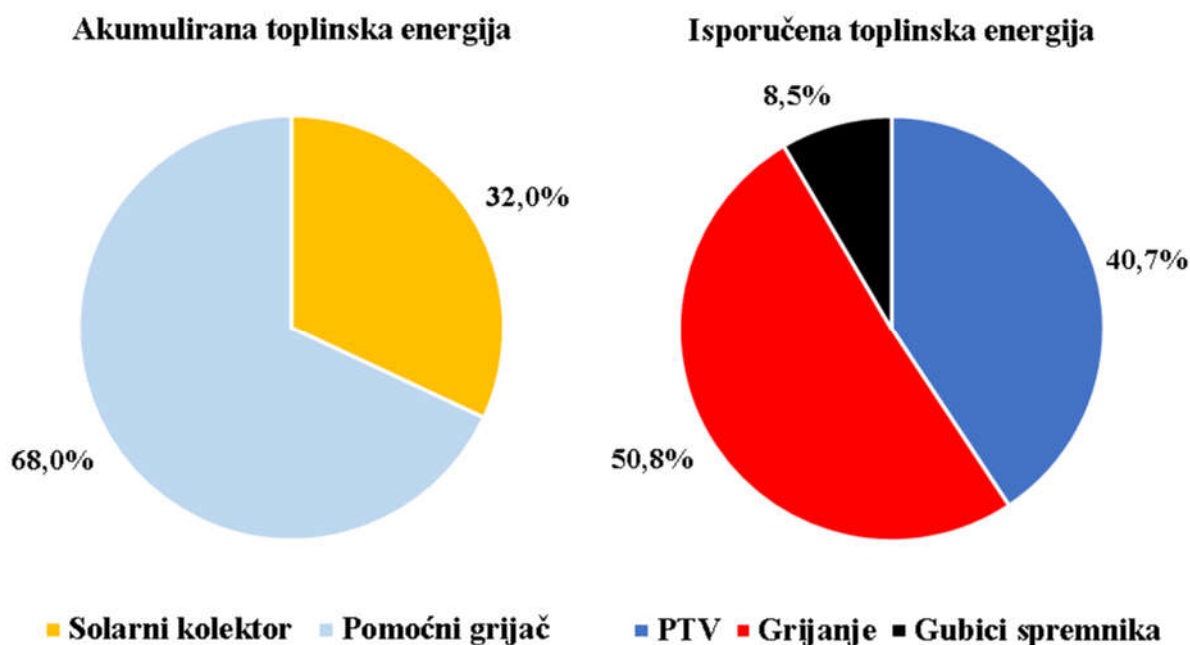
Razdoblje	$Q_{sto;W;dis}$ [kWh]	$Q_{sto;H;dis}$ [kWh]	$Q_{sto;ls;tot}$ [kWh]	$Q_{sto;sol;in}$ [kWh]	η_{sol} [%]	$Q_{H,sto,bu,in}$ [kWh]
Godina	2714,1	11875,4	538,9	2260,6	40,3	12741,4
Siječanj	230,5	3421,3	35,1	60,8	44,5	3626,1
Veljača	208,2	2183,4	31,9	123	50	2300,3
Ožujak	230,5	1450,3	35,8	249	49,4	1466,9
Travanj	223,1	386,4	37,2	275,5	51,8	367,9
Svibanj	230,5	0	59,8	241,3	35,7	24,2
Lipanj	223,1	0	57,8	249,7	37,6	7,2
Srpanj	230,5	0	59,8	265,5	40,4	0
Kolovoz	230,5	0	59,8	257,4	31,7	8,2
Rujan	223,1	0	56	225,8	41,5	31,2
Listopad	230,5	509,5	36,6	216,2	46,9	558,8
Studeni	223,1	1140,2	34,1	69,5	29,1	1327,7
Prosinac	230,5	2784,3	35,1	26,9	19,3	3022,9

U Tablici 10 i na Slici 46 dani su godišnji i mjesečni rezultati proračuna po satnoj metodi pri referentnim parametrima proračuna i godišnjoj potrebnoj toplinskoj energiji za grijanje od 70 kWh/m^2 . Najveća razlika u odnosu na dinamičku simulaciju iznos je toplinskih gubitaka spremnika koji je kod ove metode znatno manji. Godišnji udio doprinosa solarnog grijača ne razlikuje se puno u odnosu na rezultat dinamičke simulacije. Ovom metodom proračunata je potreba za radom pomoćnog grijača u svim mjesecima u godini osim u srpnju, dok kod svih ostalih metoda solarni sustav također pokriva cjelokupne potrebe u lipnju i kolovozu, a kod nekih i u svibnju pri istom toplinskom opterećenju sustava.



Slika 46. Udjeli akumulirane i isporučene toplinske energije iz spremnika na godišnjoj razini za zgradu s $Q_{H;nd} = 70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – mjesečna metoda

5.4.2. Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje 20 kWh/m^2



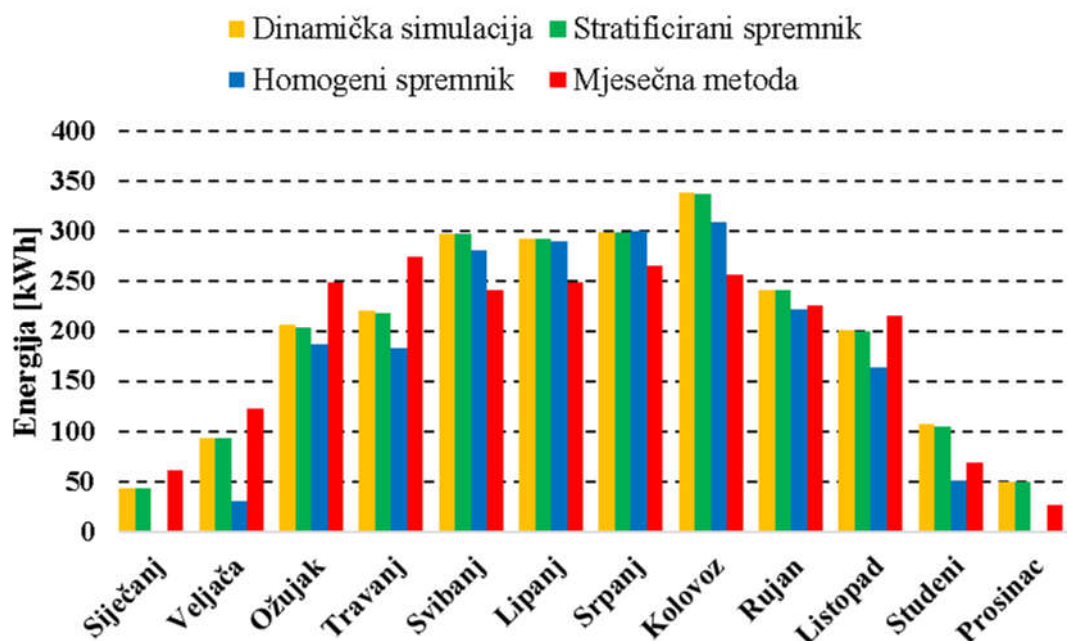
Slika 47. Udjeli akumulirane i isporučene toplinske energije iz spremnika na godišnjoj razini za zgradu s $Q_{H;nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ – mjesečna metoda

Tablica 11. Rezultati proračuna po mjesečnoj metodi za zgradu s $Q_{H,nd} = 20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$

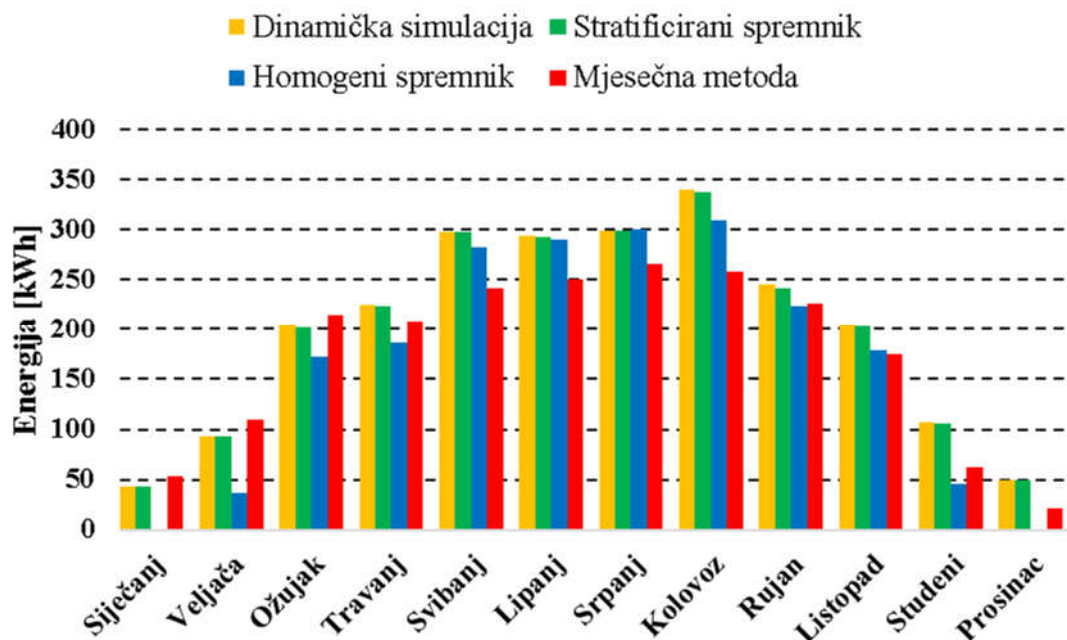
Razdoblje	$Q_{sto;W;dis}$ [kWh]	$Q_{sto;H;dis}$ [kWh]	$Q_{sto;ls;tot}$ [kWh]	$Q_{sto;sol;in}$ [kWh]	η_{sol} [%]	$Q_{H,sto,bu,in}$ [kWh]
Godina	2714,1	3392,5	565,4	2084,2	37,1	4434,8
Siječanj	230,5	1359,3	35,2	53,3	39	1571,6
Veljača	208,2	630,2	32,2	110	44,7	760
Ožujak	230,5	259,7	38,1	215	42,6	310,3
Travanj	223,1	0	51,7	207,8	39,1	49,1
Svibanj	230,5	0	59,8	241,3	35,7	24,2
Lipanj	223,1	0	57,8	249,7	37,6	7,2
Srpanj	230,5	0	59,8	265,5	40,4	0
Kolovoz	230,5	0	59,8	257,4	31,7	8,2
Rujan	223,1	0	56	225,8	41,5	31,2
Listopad	230,5	0	45,8	174,7	37,9	90,9
Studeni	223,1	127,8	34,2	62	25,9	322,8
Prosinac	230,5	1015,4	35,1	21,8	15,6	1259,2

U Tablici 11 i na Slici 47 dani su godišnji i mjesečni rezultati proračuna po satnoj metodi pri referentnim parametrima proračuna i godišnjoj potrebnoj toplinskoj energiji za grijanje od $20 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. I kod ovog opterećenja toplinski gubici su manji u odnosu na dinamičku simulaciju, a solarni kolektor također pokriva ukupne toplinske potrebe samo u srpnju. Udio proizvedene energije solarnog kolektora na godišnjoj razini nešto je manji u usporedbi s dinamičkom simulacijom. Suprotno svim ostalim analiziranim metodama proračuna, kod ove je metode iznos toplinskih gubitaka nešto veći, a solarni doprinos manji pri manjem toplinskom opterećenju sustava.

5.5. Usporedbe rezultata proračuna



Slika 48. Usporedba rezultata proračuna akumulirane toplinske energije solarnog podsustava u spremnik pri opterećenju od 70 kWh/m²a



Slika 49. Usporedba rezultata proračuna akumulirane toplinske energije solarnog podsustava u spremnik pri opterećenju od 20 kWh/m²a

Kod svih korištenih metoda proračuna za obje razine godišnjeg toplinskog opterećenja sustava u svim je vremenskim intervalima iz spremnika isporučena sva potrebna energija podsustavu grijanja i PTV-a pri minimalnoj ili višoj temperaturi. Usporedbe rezultata mjesečne akumulirane energije solarnog sustava dane su na Slikama 48 i 49. Satna metoda sa stratifikacijom temperature u spremniku daje najveću razinu poklapanja s rezultatima dinamičke simulacije. Prikupljena sunčeva energija proračunata mjesečnom metodom u ljetnim je mjesecima primjetno niža u odnosu na ostale metode. Akumulirana energija solarnog podsustava kod pojednostavljene satne metode najviše odstupa od ostalih metoda tijekom hladnih mjeseci u kojima je temperatura donjih dijelova spremnika kod ostalih metoda niža.

U tablici 12 dana su godišnja odstupanja rezultata proračuna analiziranih metoda u odnosu na rezultate dinamičke simulacije za obje analizirane godišnje razine toplinskog opterećenja zgrade. Odstupanja satne metoda sa stratifikacijom temperature u spremniku vrlo su niska. Pojednostavljena satna metoda sa homogenom temperaturom spremnika i mjesečna metoda daju značajno niže rezultate akumulirane energije solarnog sustava u odnosu na dinamičku simulaciju. Najveća odstupanja u proračunima su kod toplinskih gubitaka koje pojednostavljena satna metoda precjenjuje, a mjesečna podcjenjuje. Odstupanja učinkovitosti solarnog sustava jednaka su odstupanjima akumulirane solarne energije jer je učinkovitost definirana kao omjer akumulirane energije i ukupne dozračene energije na ravlinu kolektora koja je jednaka kod svih metoda.

Tablica 12. Odstupanje godišnjih rezultata analiziranih metoda od rezultata dinamičke simulacije na godišnjoj razini

Metoda	Stratificirana		Homogena		Mjesečna	
kWh/m ² a	70	20	70	20	70	20
$Q_{sto,sol,in}$ [%]	-0,21	0,02	-15,4	-15,22	-5,24	-12,7
$Q_{H,sto,bu,in}$ [%]	0,08	-0,06	3,64	10,59	-1,42	-0,06
$Q_{sto,ls,tot}$ [%]	1,32	0,18	14,62	15,12	-25,13	-21,1
η_{sol} [%]	-0,21	0,02	-15,4	-15,22	-5,24	-12,7

6. PARAMETARSKA ANALIZA

U nastavku su analizirani utjecaji različitih parametara na akumuliranu toplinsku energiju solarnog sustava, pomoćnog grijača i na toplinske gubitke spremnika. Ispitan je utjecaj iznosa i raspodjele potrošnje potrošne tople vode kroz dan, temperature polaza podsustava grijanja prostora, regulacije pomoćnog grijača, postavne temperature spremnika, veličine akumulacijskog spremnika i koeficijenta prolaza topline izmjenjivača solarnog kruga. Analiza je provedena varijacijom navedenih parametara kod niza godišnjih simulacija rada dinamičkog modela opisanog u poglavlju 2. Simulacije su provedene za godišnju potrebnu toplinsku energiju za grijanje od 70 kWh/m^2 , a svi parametri koji nisu varirani odnose se na referentno stanje opisano u poglavlju 4.

6.1. Koeficijent prolaza topline izmjenjivača solarnog kruga

Parametar kojim se opisuje rad izmjenjivača topline solarnog kruga u modelu je koeficijent izmjenjivača topline. Njegovo je fizikalno značenje umnožak površine izmjene topline i koeficijenta prolaza topline izmjenjivača topline. Analiza utjecaja koeficijenta prolaza izmjenjivača topline provedena je varijacijom koeficijenta izmjenjivača topline uz pretpostavku da je u svim slučajevima površina izmjene topline jednaka.

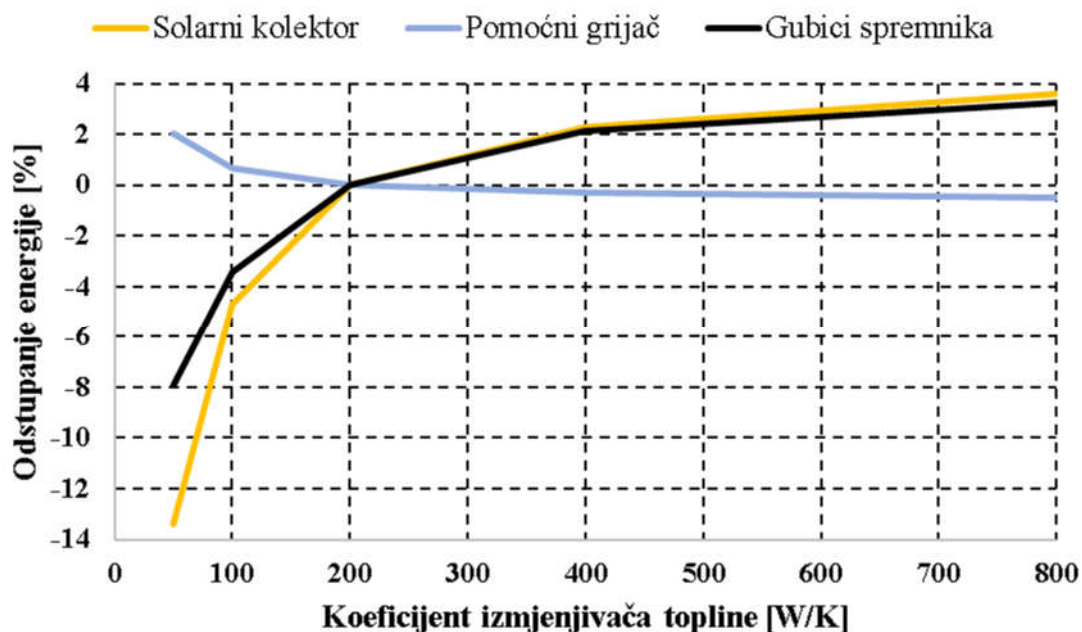
U Tablici 13 dani su rezultati utjecaja vrijednosti koeficijenta izmjenjivača topline solarnog kruga na proizvedenu toplinu i toplinske gubitke spremnika. Na Slici 50 prikazana su odstupanja proizvedene energije solarnog sustava i pomoćnog grijača te toplinskih gubitaka akumulacijskog spremnika u odnosu na vrijednosti proračunate za referentni iznos koeficijenta izmjenjivača solarnog kruga koji iznosi 200 W/K .

Povećanjem koeficijenta izmjenjivača topline raste proizvodnja topline solarnog podsustava i toplinski gubici spremnika, a pada potrebna toplina koju isporučuje pomoćni grijač. Za veći koeficijent $H_{\text{sol;exh}}$ manja je temperaturna razlika između polaza solarnog kruga i vode u dijelu spremnika gdje je smješten izmjenjivač solarnog kruga. te je temperatura polaza solarnog kruga niža što ima povoljan utjecaj na učinkovitost solarnog kolektora. Utjecaj promjene vrijednosti koeficijenta topline veći je kod nižih vrijednosti u odnosu na više vrijednosti $H_{\text{sol;exh}}$ čijim daljnjim povećanjem prikupljena sunčeva energija asimptotski teži maksimalnoj vrijednosti koja odgovara slučaju kod kojeg je solarni krug direktno spojen sa spremnikom i temperatura polaza solarnog kruga jednaka je temperaturi na dnu spremnika. Toplinski gubici spremnika rastu zbog više prosječne temperature vode u donjem dijelu spremnika koja je rezultat povećane

akumulacije toplinske energije solarnog sustava. Za odabir optimalne konstrukcije izmjenjivača topline solarnog kruga potrebno je uz poznavanje prosječnog koeficijenta izmjenjivača topline provesti i ekonomsku analizu sustava.

Tablica 13. Rezultati parametarske analize koeficijenta izmjenjivača topline – dinamička simulacija

Koeficijent izmjenjivača [W/K]	$Q_{sto;sol;in}$ [kWh]	η_{sol} [%]	$Q_{H,sto,bu,in}$ [kWh]	$Q_{sto;ls;tot}$ [kWh]
50	2309,18	41,15	12865,92	592,85
100	2368,19	42,2	12878,88	655,96
200	2393,91	42,66	12915,84	718,76
400	2425,06	43,22	12935,36	769,33
800	2448,72	43,64	12961,28	817,98



Slika 50. Odstupanja rezultata analize u odnosu na referentni koeficijent izmjenjivača topline od 200 W/K – dinamička simulacija

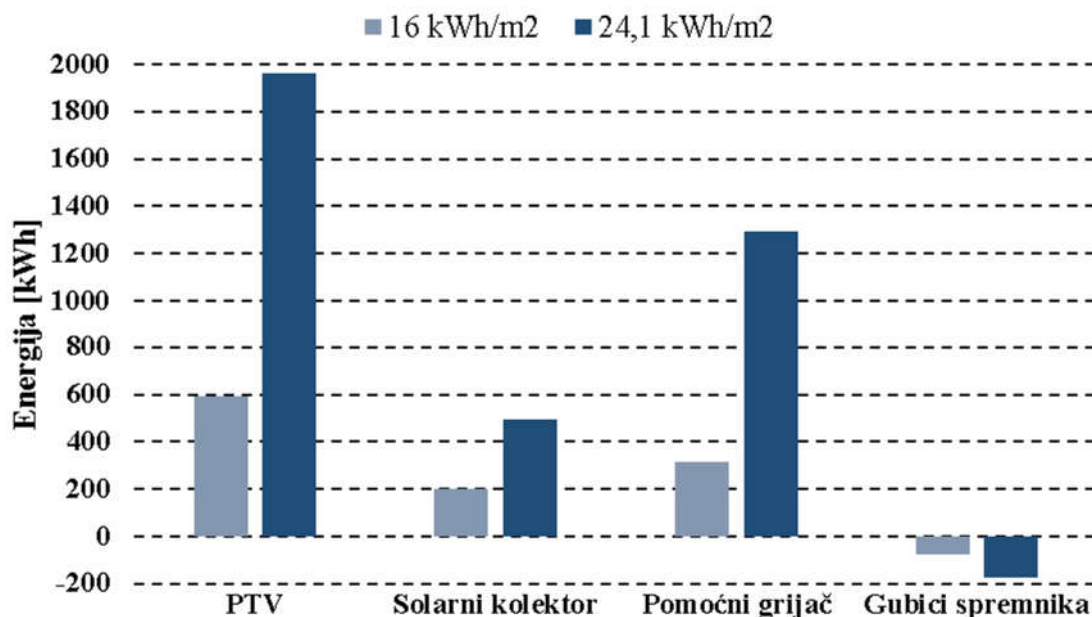
6.2. Iznos i raspodjela potrošnje PTV-a kroz dan

Kod analize utjecaja potrošnje potrošne tople vode na rad analiziranog sustava ispitane su tri razine iznosa godišnje energije za potrebe PTV-a. Najniža razina iznosi 12,5 kWh/m² godišnje i referentna je vrijednost koja se koristi kod zgrada s 3 ili manje stambenih jedinica, srednja razina iznosi 16 kWh/m² godišnje i referentna je vrijednost kod zgrada s više od tri stambenih jedinica, a najviša razina iznosi 24,1 kWh/m² godišnje što odgovara iskustvenoj potrošnji od 50 litara po osobi potrošne tople vode temperature 45 °C. Potrošnja energije jednaka je u svakom danu u godini, pri čemu su analizirane dvije različite raspodjele potrošnje PTV-a u danu. Prva je referentna raspodjela za jednoobiteljsku kuću prema normi FprEN 12831-3:2016 opisana u poglavlju 4, a druga je raspodjela jednolika potrošnja od 7 do 21 sati uz nultu razinu potrošnje od 22 do 6 sati.

Kod svih šest analiziranih slučajeva, u svakom je vremenskom intervalu iz spremnika isporučena potrebna toplinska energija za potrebe grijanja i potrošne tople vode pri dovoljno visokoj temperaturi. Zbog toga je količina isporučene toplinske energije za potrebe PTV-a jednaka kod oba profila potrošnje, a količina isporučene energije za grijanje jednaka je u svih 6 simulacija. Kao posljedica toga, ukupna proizvedena količina topline koja se predaje spremniku vrlo se malo razlikuje kod dva analizirana profila i posljedica je različitih toplinskih gubitaka spremnika i dnevnih temperaturnih profila segmenta 1 koji utječu na učinkovitost solarnog sustava.

Tablica 14. Rezultati parametarske analize iznosa i raspodjele PTV-a – dinamička simulacija

PTV [kWh/m ² a]	Raspodjela	$Q_{sto;sol,in}$ [kWh]	η_{sol} [%]	$Q_{H,sto,bu,in}$ [kWh]	$Q_{sto,W,dis}$ [kWh]	$Q_{sto;ls,tot}$ [kWh]
12,5	Norma [9]	2193,66	39,09	12600,96	2120,39	797,02
	Ravnomjerna	2191,76	39,06	12603,04	2120,39	796,98
16	Norma [9]	2393,91	42,66	12915,84	2714,10	718,76
	Ravnomjerna	2397,60	42,73	12910,88	2714,10	717,23
24,1	Norma [9]	2687,11	47,89	13893,60	4084,71	619,77
	Ravnomjerna	2708,70	48,27	13869,12	4084,71	616,83



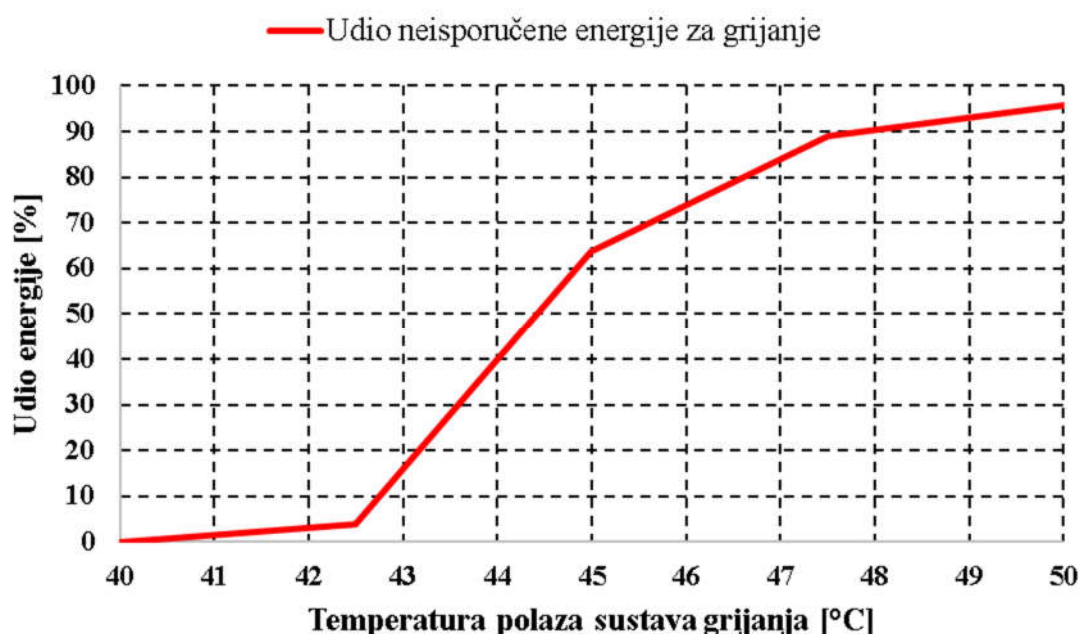
Slika 51. Razlika proizvedenih i predanih toplina u odnosu na iznos potrošnje PTV-a od 12,5 kWh/m²a za temperaturni profil prema normi [9] – dinamička simulacija

U Tablici 14 dani su rezultati analize parametara iznosa i raspodjele potrošnje PTV-a kroz dan. Na Slici 51 prikazana su povećanja ukupne godišnje isporučene energije za PTV, akumulirane energije solarnog sustava i pomoćnog grijača te smanjenje toplinskih gubitaka u odnosu na najnižu analiziranu razinu potrošnje energije PTV-a od 12,5 kWh/m² pri dnevnom profilu potrošnje prema normi [9]. Najviši analizirani iznos potrošnje energije za potrebe PTV-a gotovo je duplo veći od najnižeg analiziranog iznosa. Povećanjem potreba za PTV-om raste proizvodnja energije i solarnog kolektora i pomoćnog grijača, pri čemu je apsolutni iznos porasta akumulirane energije pomoćnog grijača veći. Povećanjem potrošnje PTV-a smanjuju se toplinski gubici spremnika što se može objasniti nižom prosječnom temperaturom spremnika zbog većeg dotoka svježje vode u spremnik. Iz istog razloga povećanjem potrošnje energije za PTV raste i učinkovitost solarnog sustava. Odstupanja svih energetske rezultata analize ravnomjerne raspodjele potrošnje manja su od 1 % u odnosu na raspodjelu prema normi [9]. Razlika učinkovitosti solarnog sustava između dva analizirana profila potrošnje PTV-a raste povećanjem potrebne energije za PTV.

6.3. Temperatura polaza sustava grijanja

Temperatura polaza sustava grijanja zbog načina na koji je modelirano odvođenje topline iz spremnika za potrebe podsustava grijanja prostora nema utjecaj na predanu i proizvedenu toplinu sustava sve dok je zadovoljen uvjet minimalne temperature dijela spremnika u kojem je smješten izmjenjivač topline. Regulacija kruga grijanja nije obuhvaćena ovim radom zbog čega je uvedena pretpostavka da je potrebna toplinska energija iz spremnika predana podsustavu grijanja u vremenskom koraku kad je temperatura segmenta spremnika u kojem je smješten izmjenjivač topline kruga grijanja viša od temperature polaza grijanja uvećane za razliku na izmjenjivaču topline. U suprotnom slučaju zbog premale temperaturne razlike na izmjenjivaču topline u tom vremenskom koraku nije predana toplinska energija za potrebe grijanja.

Na Slici 52 prikazan je udio neisporučene energije iz spremnika za grijanje u ovisnosti o temperaturi polaza sustava grijanja. Udio neisporučene energije raste približavanjem regulacijskom rasponu pomoćnog grijača i na donjoj granici od 45 °C iznosi 63,8 %. Na temelju provedene analize može se zaključiti da za analizirani sustav donja granica regulacijskog raspona pomoćnog grijača treba biti barem 5 °C viša od temperature polaza sustava grijanja kako bi sva potrebna toplina bila isporučena iz spremnika.

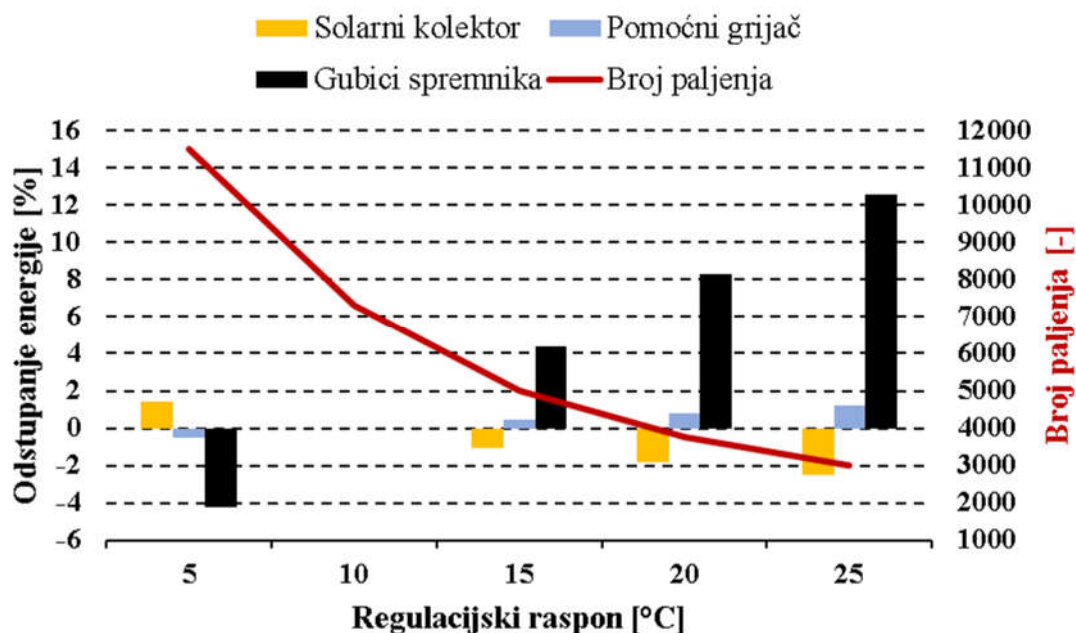


Slika 52. Udio neisporučene energije za grijanje iz spremnika u zavisnosti o temperaturi polaza sustava grijanja pri referentnim parametrima dinamičke simulacije

6.4. Regulacija

U analiziranom sustavu pomoćni grijač reguliran je dvopoložajnom regulacijom na način da se pali kad temperatura segmenta spremnika u kojem je smješten izmjenjivač topline grijača padne ispod donje regulacijske granice te se gasi kad dostigne vrijednost gornje regulacijske granice. Ispitan je utjecaj regulacijskog raspona temperature na rad sustava tako što je varirana gornja granica raspona. Donja granica držana je na konstantnoj vrijednosti od 45 °C kako bi se osiguralo da sva energija potrebna za grijanje i za pripremu PTV-a bude isporučena iz spremnika. Isporučena energija za grijanje i za PTV u svim je analiziranim slučajevima jednakog iznosa. Rezultati za analizirane temperaturne raspone dani su u Tablici 15.

Na Slici 53 prikazana su odstupanja proizvedene energije solarnog sustava i pomoćnog grijača te toplinskih gubitaka akumulacijskog spremnika u odnosu na vrijednosti proračunate za referentni raspon od 10 °C. Na slici je također prikazan broj paljenja pomoćnog grijača u ovisnosti o regulacijskom rasponu. Povećanjem regulacijskog raspona primjetno rastu toplinski gubici spremnika, no zbog njihovog malog udjela u ukupnoj isporučenoj energiji i zbog jednakih isporučenih energija podsustavima grijanja i PTV-a, odstupanja proizvedene energije relativno su malena. Količina akumulirane solarne energije pada povećanjem regulacijskog raspona, a proizvedena energija pomoćnog grijača raste čime se nadoknađuju veći gubici spremnika i manji doprinos solarnog sustava.



Slika 53. Broj paljenja pomoćnog grijača ovisno o regulacijskom rasponu i odstupanja rezultata analize u odnosu na regulacijski raspon od 10 °C – dinamička simulacija

Tablica 15. Rezultati parametarske analize temperaturnog raspona regulacije pomoćnog grijača – dinamička simulacija

Regulacijski raspon [°C]	$Q_{sto;sol;in}$ [kWh]	η_{sol} [%]	$Q_{H,sto,bu,in}$ [kWh]	$Q_{sto;ls;tot}$ [kWh]	Broj paljenja [-]
5	2427,64	43,26	12851,04	688,06	11527
10	2393,91	42,66	12915,84	718,76	7311
15	2367,61	42,19	12974,24	750,22	5005
20	2349,88	41,88	13021,28	778,3	3766
25	2333,1	41,58	13070,24	809,28	3009

Iako se smanjenjem regulacijskog raspona postižu manji gubici spremnika, povećava se učinkovitost solarnog sustava i udio akumulirane solarne energije uz uštedu energije koju pomoćni grijač mora proizvesti, te su prednosti relativno skromne. Nasuprot tome, smanjenjem regulacijskog raspona, broj ciklusa paljenja pomoćnog grijača na godišnjoj razini raste što je nepovoljno s aspekta njegove učinkovitosti i može uzrokovati poteškoće pri radu. Zbog toga je za odabir optimalne vrijednosti regulacijskog raspona u analizu potrebno uključiti i utjecaj učestalosti paljenja na učinkovitost pomoćnog grijača.

6.5. Postavna temperatura vode u spremniku

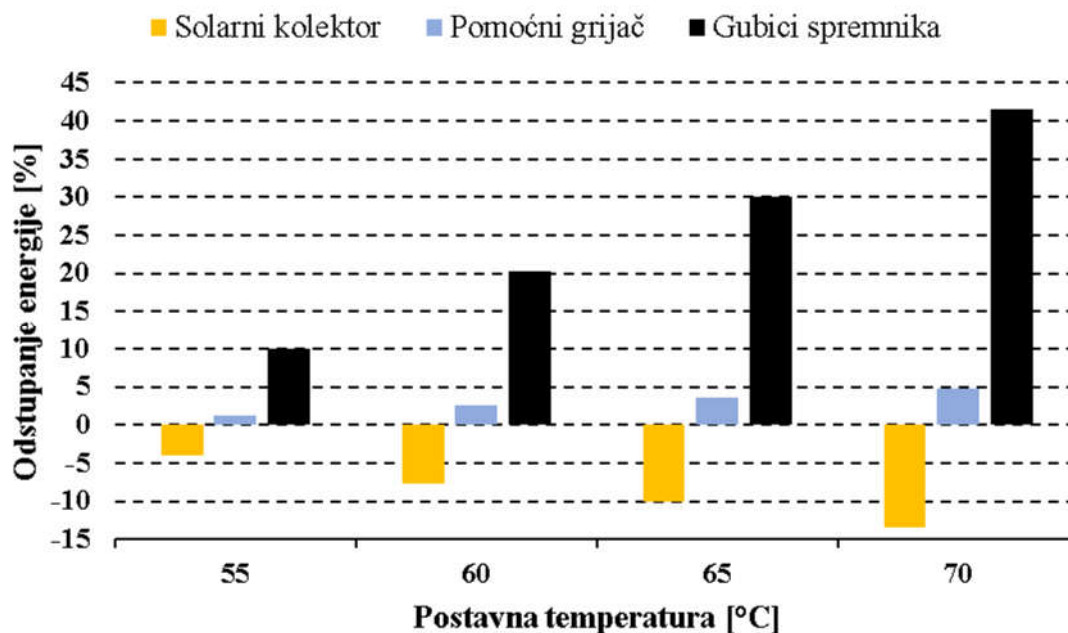
Kod korištenog modela sustava pretpostavljeno je da je gornja polovica spremnika grijana pomoćnim grijačem, dok se u donju polovicu spremnika toplina pomoćnog grijača ne predaje. Rad pomoćnog grijača ovisi o temperaturi vode u segmentu u kojem se nalazi njegov izmjenjivač topline te o postavnoj temperaturi i regulacijskom rasponu grijača. Analiziran je utjecaj postavne temperature pri čemu je najniža analizirana temperatura jednaka referentnoj postavnoj temperaturi od 50 °C jer bi njezino smanjivanje u pojedinim vremenskim koracima uzrokovalo prenisku temperaturu za predaju energije podsustavu grijanja i PTV-a. Kod analize je korišten referentni temperaturni regulacijski raspon od 10 °C sa postavnom temperaturom u sredini raspona.

Rezultati analize postavne temperature spremnika prikazani su u Tablici 16. U svim analiziranim slučajevima isporučena je sva potrebna energija za potrebe grijanja i PTV-a pri dovoljno visokoj temperaturi. Na Slici 54 prikazana su odstupanja proizvedene energije solarnog sustava i pomoćnog grijača te toplinskih gubitaka akumulacijskog spremnika u odnosu na vrijednosti proračunate za referentnu postavnu temperaturu od 50 °C.

Tablica 16. Rezultati analize postavne temperature pomoćnog grijača – dinamička simulacija

Postavna temperatura [°C]	$Q_{sto;sol;in}$ [kWh]	η_{sol} [%]	$Q_{H,sto,bu,in}$ [kWh]	$Q_{sto;ls;tot}$ [kWh]
50	2393,91	42,66	12915,84	718,76
55	2299,99	40,99	13082,4	790,45
60	2211,68	39,42	13245,44	864,59
65	2155,47	38,41	13373,6	935,37
70	2072,37	36,93	13540,16	1017,47

Porastom postavne temperature rastu toplinski gubici spremnika, pada učinkovitost i akumulirana energija solarnog kruga i raste količina energije koju proizvodi pomoćni grijač. Razlike akumulirane energije puno su veće u odnosu na razlike kod analize regulacijskog raspona. Može se zaključiti da parametar postavne temperature spremnika ima velik utjecaj na rad sustava. Optimalna postavna temperatura spremnika najniža je pri kojoj je još uvijek isporučena sva potrebna energija za grijanje i pripremu PTV-a.



Slika 54. Odstupanja rezultata analize u odnosu na referentnu postavnu temperaturu od 50 °C – dinamička simulacija

6.6. Veličina spremnika tople vode

Količina energije koja se može akumulirati unutar spremnika ovisi o ukupnom toplinskom kapacitetu vode u spremniku. Analiziran je utjecaj varijacije volumena spremnika na rad sustava pri čemu je konstantnim držan koeficijent toplinskih gubitaka spremnika sveden na površinu plašta. Kao površina plašta spremnika korištena je površina plašta valjka volumena jednakog spremniku i fiksne visine od 1,5 metara.

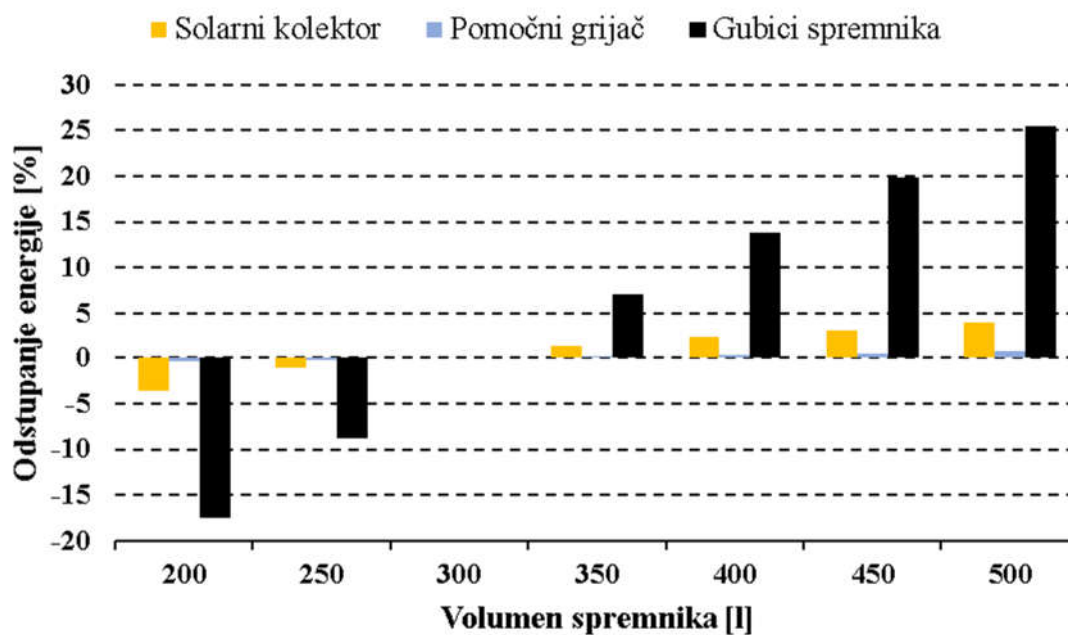
U Tablici 17 dani su rezultati analize volumena akumulacijskog spremnika. Na Slici 55 prikazana su odstupanja akumulirane energije solarnog sustava i pomoćnog grijača te toplinskih gubitaka akumulacijskog spremnika u odnosu na vrijednosti proračunate za referentni volumen spremnika od 300 litara. Povećanjem volumena spremnika raste učinkovitost solarnog sustava i prikupljena solarna energija zbog manje osjetljivosti temperature spremnika o količini akumulirane energije solarnog sustava. Toplinski gubici spremnika također rastu povećanjem njegove veličine zbog veće površine plašta akumulacijskog spremnika. Iznos porasta gubitaka nešto je veći od porasta proizvodnje topline solarnog kolektora što zahtijeva blagi porast energije koju pomoćni grijač treba nadoknaditi.

Kako bi se povećao udio solarnog doprinosa u proizvodnji topline, povećanje veličine spremnika treba pratiti povećanje debljine izolacije spremnika kako toplinski gubici spremnika

ne bi rasli. Sve to utječe na cijenu spremnika pa je potrebno provesti ekonomsku analizu kako bi se pronašao optimalni volumen spremnika za korišteni sustav.

Tablica 17. Rezultati parametarske analize volumena akumulacijskog spremnika – dinamička simulacija

Volumen spremnika [l]	$Q_{\text{sto;sol;in}}$ [kWh]	η_{sol} [%]	$Q_{\text{H,sto,bu,in}}$ [kWh]	$Q_{\text{sto;ls;tot}}$ [kWh]
200	2309,18	41,15	12865,92	592,85
250	2368,19	42,2	12878,88	655,96
300	2393,91	42,66	12915,84	718,76
350	2425,06	43,22	12935,36	769,33
400	2448,72	43,64	12961,28	817,98
450	2467,63	43,98	12985,92	861,45
500	2488,67	44,35	13005,92	901,88



Slika 55. Odstupanja rezultata analize u odnosu na referentni volumen spremnika od 300 l – dinamička simulacija

7. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bilo je istražiti mogućnosti proračuna solarnih sustava pomoću metoda različitih kompleksnosti i ispitati utjecaj različitih parametara na rad solarnih sustava. Godišnja simulacija rada podsustava solarnog kolektora, pomoćnog grijača i spremnika tople vode provedena je pomoću dinamičkog modela sa vremenskim korakom od 0,02 sata te pomoću metoda iz normi HRN EN 15316-5:2017 i HRN EN 15316-4-3:2017 sa satnim i mjesečnim vremenskim korakom.

Za potrebe provođenja simulacije rada sustava i parametarske analize izrađen je dinamički model sustava u programskom paketu *TRNSYS 17*. Model se sastoji od međusobno povezanih komponenata solarnog kolektora, spremnika tople vode, *MATLAB* skripte i *online plottera* kojim se prikazuje temperatura u spremniku tijekom simulacije. Unutar *MATLAB* skripte modelirana je regulacija solarnog kruga i pomoćnog grijača i provodi se proračun potrebnog masenog protoka PTV-a te se pomoću nje unose i spremaju ulazne i izlazne veličine proračuna. Provedena je analiza utjecaja vremenskog koraka simulacije na točnost rezultata te je odabran optimalni vremenski korak od 0,02 h.

Na analizirani sustav primijenjene su tri različite metode proračuna prema normama HRN EN 15316-5:2017 koja opisuje proračun akumulacijskog spremnika i HRN EN 15316-4-3:2017 koja opisuje proračun solarnog toplovodnog sustava. Prvom metodom modeliran je rad sustava na satnoj razini pri čemu je spremnik podijeljen na više volumnih dijelova različitih temperatura. Druga metoda je pojednostavljena satna metoda pri kojoj je voda unutar spremnika modelirana jednim volumenom homogene temperature. Pri satnim metodama korištena je kombinacija obje korištene norme. Kod treće metode pri kojoj je sustav modeliran na mjesečnoj razini koristi se samo norma HRN EN 15316-4-3:2017. Primijećen je velik broj grešaka i nelogičnosti unutar norme HRN EN 15316-5:2017 zbog čega je bilo potrebno uvesti modifikacije u proračunske procedure kako bi norma bila primjenjiva na analizirani sustav.

Proračuni su provedeni nad referentnom stambenom kućom na području grada Zagreba pri dvije razine godišnjih energetske potrebe za grijanjem prostora od 20 i 70 kWh/m². Satna raspodjela potrebne toplinske energije za grijanje prostora, $Q_{H,nd}$ proračunata je korištenjem računalnog programa *MGIPU Energetski Certifikator*. Dnevni profil potrošnje PTV-a za jednoobiteljske zgrade preuzet iz norme FprEN 12831-3:2016. U proračunima su korišteni meteorološki podaci za karakteristične dane u pojedinim mjesecima u godini preuzeti iz programa *MGIPU Energetski Certifikator*.

Rezultati proračuna prema dinamičkom modelu pokazuju da je za obje razine potrebne godišnje toplinske energije iz spremnika u svakom vremenskom koraku proračuna isporučena sva potrebna energija za potrebe grijanja prostora i za pripremu potrošne tople vode na dovoljno visokoj temperaturi. U sustavu s godišnjim potrebama za grijanje od 70 kWh/m^2 solarnim je sustavom pokriveno 15,6 % ukupnih energetske potrebe, a udio toplinskih gubitaka spremnika iznosi 4,7 %. Kod sustava s godišnjim potrebama za grijanje od 20 kWh/m^2 , udio solarne energije iznosi 35,0 %, a udio gubitaka iznosi 10,5 %. Ukupna godišnja učinkovitost solarnog sustava iznosi 42,5 % pri obje analizirane razine toplinskog opterećenja sustava.

Od analiziranih proračuna prema normama rezultate najbliže dinamičkoj simulaciji u *TRNSYS-u* daje satna metoda sa stratifikacijom temperature u spremniku. Kod obje razine godišnjih toplinskih potreba za grijanjem prostora, odstupanja akumulirane energije solarnog kolektora i pomoćnog grijača manja su od 0,5 %, a odstupanja toplinskih gubitaka spremnika manja su od 1,5 %.

Pojednostavljena satna metoda sa homogenom temperaturom spremnika zbog u hladnijim mjesecima relativno visokih temperatura donjeg dijela spremnika daje godišnje oko 15 % manje prikupljene sunčeve energije u odnosu na dinamičku simulaciju pri obje razine energetske potreba. Zbog pojednostavljenog načina računanja toplinskih gubitaka spremnika koristeći postavnu temperaturu, ova metoda daje oko 15 % veće toplinske gubitke u odnosu na dinamičku simulaciju za obje razine energetske potreba.

Prema mjesečnoj metodi u ljetnim je mjesecima prikupljeno značajno manje sunčeve energije u usporedbi s dinamičkim modelom zbog čega je na godišnjoj razini prikupljeno 5,2, odnosno 12,7 % manje energije pri godišnjim energetske potrebama za grijanje prostora od 70, odnosno 20 kWh/m^2 . Vrijednosti toplinskih gubitaka spremnika dobivene mjesečnom metodom manja su za 25 i 21 % pri potrebama za grijanje od 70 i 20 kWh/m^2 .

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da se satna norma sa stratificiranom temperaturom spremnika može koristiti kao adekvatna zamjena za kompliciranije dinamičke modele sustava. Zbog jednostavnosti implementacije i relativno malih odstupanja rezultata s obzirom na vremenski korak, mjesečna metoda može se koristiti za grubu procjenu rada solarnih sustava kod preliminarnih proračuna. Korištenjem pojednostavljene satne metode sa homogenim spremnikom ne ostvaruju se značajne prednosti koje bi opravdavale povećanje kompleksnosti proračuna u odnosu na mjesečnu metodu.

Prema provedenoj parametarskoj analizi može se zaključiti da dnevni profil potrošnje PTV-a ima iznenađujuće malen utjecaj na proizvodnju energije čija su odstupanja za analizirane profile

manja od 1%. Povećanjem godišnje potrošnje energije za potrebe PTV-a raste proizvodnja energije i solarnog kolektora i pomoćnog grijača. Solarni kolektor pokriva 39, odnosno 28 % povećanih energetske potrebe kod povećanja godišnjih potreba za potrebe PTV-a sa 12,5 na 16, odnosno 24,1 kWh/m². Učinkovitost solarnog sustava za oba profila iznosi 39 % pri potrebama od 12,5 kWh/m², 42,7 % pri potrebama od 16 kWh/m², dok je pri potrebama od 24,1 kWh/m² značajnija razlika i iznosi 47,9 % kod referentnog profila i 48,3 % kod ravnomjernog profila.

Temperatura polaza kruga grijanja u korištenom modelu sustava nema utjecaj na proizvedenu i isporučenu energiju sve dok je dovoljno niska u odnosu na temperaturu vode u spremniku kako bi se sva potrebna energija mogla isporučiti na potrebnoj temperaturi. U analiziranom sustavu donja regulacijska granica pomoćnog grijača treba biti barem 5 °C viša od temperature polaza sustava grijanja da bi u svakom trenutnu temperaturna razlika na izmjenjivaču topline sustava grijanja bila dovoljna za isporuku potrebne toplinske energije.

Povećanjem temperaturnog raspona regulacije pomoćnog grijača blago raste potrebna toplota pomoćnog grijača i toplinski gubici spremnika uz smanjenje akumulirane topline solarnog kolektora, ali pada broj paljenja pomoćnog grijača na godišnjoj razini. Kod raspona regulacije od 25 °C u odnosu na referentnu vrijednost od 10 °C potrebna energija pomoćnog grijača 1,2 % je veća, a broj paljenja grijača manji je 58,8 %.

Postavna temperatura spremnika ima velik utjecaj na toplinske gubitke spremnika i raspodjelu proizvodnje energije solarnog kolektora i pomoćnog grijača. U odnosu na vrijednosti pri referentnoj postavnoj temperaturi od 50 °C, za svaki Celzijev stupanj povećanja postavne temperature, u analiziranom sustavu količina akumulirane topline solarnog kolektora padne za oko 0,7%, gubici spremnika rastu za oko 2 %, a potrebna energija pomoćnog grijača raste za oko 0,25 %.

Kod spremnika većih volumena nešto je veća količina prikupljene solarne energije, ali su veći i toplinski gubici spremnika zbog veće površine izmjene topline spremnika s okolinom. U sustavu s najmanjim korištenim spremnikom od 200 l, ukupna godišnja učinkovitost solarnog sustava iznosi 41,15 %, a u sustavu s najvećim spremnikom od 500 l iznosi 44,35 %. Za povećanje udjela solarne energije u sustavu potrebno je uz povećanje volumena spremnika povećati i toplinski otpor korištene izolacije spremnika.

Utjecaj promjene koeficijenta izmjenjivača topline solarnog sustava veći je kod nižih vrijednosti koeficijenta $H_{sol;exh}$. Njegovim porastom raste iznos akumulirane sunčeve energije i asimptotski teži maksimalnoj akumuliranoj energiji koja odgovara slučaju sa direktnim

zagrijavanjem vode iz spremnika solarnim kolektorom. Toplinski gubici spremnika također rastu porastom koeficijenta izmjenjivača solarnog kruga, ali je ukupan rezultat blaga ušteda energije pomoćnog grijača.

Na kraju treba napomenuti da je za ispravno vrednovanje dobivenih rezultata, razlika između korištenih metoda proračuna i utjecaja analiziranih parametara na rad sustava potrebno provesti eksperimentalnu validaciju razvijenog dinamičkog modela. Ovim radom nije obuhvaćena analiza broja segmenata na koji je spremnik podijeljen koji može utjecati na točnost proračuna. Također, za odabir optimalnih vrijednosti većine analiziranih parametara potrebno je provesti ekonomsku analizu sustava.

LITERATURA

- [1] Andrassy, M., Balen, I., Boras, I., Dović, D., Hrs Borković, Ž., Lenić, K., Lončar, D., Pavković, B., Soldo, V., Sučić, B., Švaić, S.: Priručnik za energetska certificiranje zgrada, Program Ujedinjenih naroda za razvoj – UNDP, Zagreb, 2010.
- [2] Bukarica, V., Dović, D., Hrs Borković, Ž., Soldo, V., Sučić, B., Švaić, S., Zanki, V.: Priručnik za energetske savjetnike, Program Ujedinjenih naroda za razvoj (UNDP) u Hrvatskoj, Zagreb, 2008.
- [3] http://www.fzoeu.hr/hr/energetska_ucinkovitost/enu_u_zgradarstvu/
- [4] TESSLibs 17, Volume 11, Storage Tank Library Mathematical Reference, TESS, LLC of Madison, Wisconsin, 2012.
- [5] TRNSYS 17, Volume 4, Mathematical Reference, University of Wisconsin – Madison, 2012.
- [6] FprEN 15316-5 Energy performance of buildings – Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 5: Space heating and DHW storage systems (not cooling), M3-7,M8-7, CEN, 2016.
- [7] FprEN 15316-4-3 Energy performance of buildings – Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies – Part 4-3: Heat generation systems, thermal solar and photovoltaic systems, Module M3-8-3, M8-8-3, M11-8-3, CEN, 2016
- [8] Duffie, J.A., Beckman, W.A., Solar Engineering of Thermal Processes, 4th ed. J. Willey & Sons, New York, 2013.
- [9] FprEN 12831-3 Energy performance of buildings - Method for calculation of the design heat load – Part 3: Domestic hot water systems heat load and characterization of needs, Module M8-2, M8-3, CEN, 2016.

PRILOZI

- I. CD-R disc